



**Miguel Ângelo Abrantes Patriarca**

# **UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS DE ATERRO LEVES NO DOMÍNIO DAS OBRAS GEOTÉCNICAS**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Pedro F. e M. Guedes de Melo

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Vogais: Prof. Doutora Maria Teresa Grilo Santana

Prof. Doutor Pedro F. e M. Guedes de Melo



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março de 2012**



## “UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS DE ATERRO LEVES NO DOMÍNIO DAS OBRAS GEOTÉCNICAS”

**“Copyright” Miguel Ângelo Abrantes Patriarca, FCT/UNL e UNL**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Queria expressar o meu sincero agradecimento a todos os que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, particularmente:

Ao Professor Doutor Pedro Melo, orientador da dissertação, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Professor Engenheiro Alexandre Pinto, da JetSJ Geotecnia, pela ajuda num caso de estudo;

Ao Engenheiro Carlos Reis, da Saint-Gobain Weber Portugal, por todo o material disponibilizado;

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, compreensão, paciência e incentivo durante todo o meu percurso universitário;

À Vanessa por todo o apoio dado, ajuda e compreensão pelo tempo que tive de dedicar a este estudo;

Aos meus familiares e amigos pela amizade e apoio demonstrado durante esta importante etapa da minha vida.



## RESUMO

A aplicação de materiais de aterro leves no domínio das obras geotécnicas tem registado um aumento significativo, tendo-se a destacar aplicações que visam a redução de assentamentos associados à execução de aterros, a redução dos impulsos no tardo de estruturas de suporte ou encontros de pontes e viadutos, a melhoria das condições de estabilidade de taludes e a redução de cargas de aterros executados sobre túneis ou galerias.

Os materiais leves escolhidos para análise foram: a argila expandida, o poliestireno expandido e a espuma de vidro. Pretendeu-se identificar as principais características desses materiais leves, quantificando os valores mais frequentes para os parâmetros que condicionam o seu comportamento mecânico e físico, de modo a permitir, de forma fundamentada, o cálculo das aplicações mais frequentes, com identificação das vantagens e dos inconvenientes.

O presente trabalho compreende uma descrição de casos de obra nos quais foram utilizados os materiais leves referenciados, apresentando uma breve análise à sua aplicação, expondo as vantagens e desvantagens.

A aplicação de materiais leves está associada a processos construtivos diferentes dos materiais tradicionais, expondo características particulares a nível de transporte, de colocação em obra, de processo de compactação e de pormenores construtivos.

**Termos chave:** Materiais de aterro leves, argila expandida, poliestireno expandido e espuma de vidro





## ABSTRACT

The number of applications of lightweight materials in the geotechnical field is increasing specially to reduce settlements associated to hand fills, to reduce earth pressures in retaining walls or bridge and viaduct abutments, to improve the stability of slopes and to reduce the weight of earth falls over underground structures.

The lightweight materials chosen for analysis were expanded clay, expanded polystyrene and glass foam. One of the main goals of this work was to identify the main features of lightweight material, quantifying the most frequent values for the parameters that influence their mechanical and physical behaviour, allowing, on a supported way, the calculation design of the more frequent applications, with identification of its advantages and disadvantages.

This work includes a description of Projects in which the referenced lightweight materials were, with a brief analysis of its application, exposing the advantages and disadvantages.

The applications of lightweight materials is associated to different construction processes than the ones associated to traditional materials, with particular characteristics of transportation, placement, packing process and details of construction.

**Keyword:** Lightweight materials, expanded clay, expanded polystyrene and glass foam



# ÍNDICE DE TEXTO

Resumo .....	I
Abstract.....	III
Índice de texto .....	V
Índice de Quadros .....	IX
Índice de Figuras .....	XI
Acrónimos e abreviaturas .....	XVII
1. Introdução .....	1
2. Tipos de materiais leves e o seu processo de fabrico.....	3
2.1. Argila expandida .....	3
2.2. Poliestireno expandido .....	6
2.3. Espuma de vidro.....	8
3. Tipos de aplicação .....	11
3.1. Redução de assentamentos associados à construção de aterros.....	11
3.2. Redução de cargas verticais sobre estruturas subterrâneas.....	12
3.3. Redução dos impulsos horizontais sobre estruturas.....	13
3.4. Melhoramento das condições de estabilidade de taludes .....	14
3.5. Aplicação em camadas de drenagem .....	15
3.6. Proteção de tubagens e serviços .....	15
3.7. Proteção contra o gelo .....	16
3.8. Construção de cais .....	16
4. Características dos materiais leves .....	19
4.1. Argila expandida .....	19
4.1.1. Granulometria .....	19
4.1.2. Peso volúmico .....	23
4.1.3. Resistência .....	26
4.1.4. Deformabilidade.....	30
4.1.5. Fluência .....	32
4.1.6. Permeabilidade.....	33
4.1.7. Outras características .....	33
4.2. Poliestireno expandido .....	34
4.2.1. Peso volúmico .....	34

4.2.2.	Resistência .....	34
4.2.3.	Deformabilidade.....	39
4.2.4.	Fluência .....	40
4.2.5.	Teor em água .....	43
4.2.6.	Utilização do EPS em associação a outros materiais .....	44
4.2.7.	Reação ao fogo .....	45
4.2.8.	Outras caraterísticas .....	45
4.3.	Espuma de vidro.....	47
4.3.1.	Granulometria .....	47
4.3.2.	Peso volúmico .....	50
4.3.3.	Resistência .....	52
4.3.4.	Deformabilidade.....	56
4.3.5.	Fluência .....	57
4.3.6.	Permeabilidade.....	59
4.3.7.	Outras caraterísticas .....	59
5.	Aplicação de materiais leves em aterros .....	61
5.1.	Argila expandida .....	61
5.1.1.	Transporte .....	61
5.1.2.	Colocação em obra .....	62
5.1.3.	Compactação.....	64
5.1.4.	Pormenores construtivos.....	68
5.2.	Poliestireno expandido .....	71
5.2.1.	Transporte .....	71
5.2.2.	Colocação em obra .....	71
5.2.3.	Compactação.....	73
5.2.4.	Pormenores construtivos.....	73
5.3.	Espuma de vidro.....	76
5.4.	Ensaio para o controlo de colocação .....	80
5.4.1.	Ensaio de determinação da densidade e teor em água.....	80
5.4.2.	Ensaio “Falling Weight Deflectometer” .....	81
5.4.3.	Ensaio “Cone Penetration Test” .....	82
5.4.4.	Ensaio de carga em placa clássico .....	83

---

5.4.5.	Ensaio com o penetrômetro Panda .....	84
6.	Obras realizadas com utilização de materiais leves.....	85
6.1.	Redução de assentamentos associados à construção de aterros.....	85
6.1.1.	Argila expandida .....	85
6.1.2.	Poliestireno expandido .....	94
6.1.3.	Espuma de vidro.....	96
6.2.	Redução das cargas verticais sobre estruturas subterrâneas .....	98
6.2.1.	Poliestireno expandido .....	98
6.2.2.	Espuma de vidro.....	99
6.3.	Redução dos impulsos horizontais sobre estruturas.....	101
6.3.1.	Argila expandida .....	101
6.3.2.	Poliestireno expandido .....	106
6.4.	Melhoramento das condições de estabilidade de taludes .....	108
6.4.1.	Argila expandida .....	108
6.4.2.	Espuma de vidro.....	110
7.	Considerações Finais .....	115
8.	Bibliografia .....	117



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4-1 – Diâmetros correspondentes às percentagens de partículas passadas nos diversos peneiros para a argila expandida 10-20 mm da ARGEX e da LECA .....	22
Quadro 4-2 – Peso volúmico da argila expandida LECA 10-20 mm, solta e compactada com diversas energias, pelo IST .....	23
Quadro 4-3 – Peso volúmico da argila expandida LECA 10-20 mm, solta e compactada, pelo SINTEF .....	24
Quadro 4-4 – Peso volúmico da argila expandida ARGEX 10-20 mm, solta e compactada, pelo LGAI .....	24
Quadro 4-5 – Resistência à compressão da argila expandida 10-20 mm da LECA, pelo SINTEF .....	27
Quadro 4-6 – Resistência à compressão da argila expandida 10-20 mm da ARGEX, pelo LGAI .....	27
Quadro 4-7 – Resistência à compressão de 2% e 10% da argila expandida 10-20 mm, anunciadas pela ARGEX e a LECA.....	27
Quadro 4-8 – Resistência ao esmagamento da argila expandida 10-20 mm, anunciada pela ARGEX e a LECA .....	29
Quadro 4-9 – Ângulo de resistência ao corte para diversas tensões de confinamento da argila expandida LECA 10-20 mm, pelo LNEC.....	29
Quadro 4-10 – Modulo de deformabilidade secante para uma deformação de 2 e 10% da argila expandida 10-20mm, da marca ARGEX e LECA, segundo várias instituições .....	31
Quadro 4-11 – Ensaio de resistência à fluência da argila expandida 10-20 mm da ARGEX, pelo LGAI .....	32
Quadro 4-12 – Resistência à compressão do EPS para uma deformação de 2 e 10% para os diversos pesos volúnicos, pela ACEPE e a BASF .....	36
Quadro 4-13 – Coeficiente de atrito entre blocos de EPS, com e sem elementos de confinamento, segundo o ensaio realizado na Geofoam Research Center .....	38
Quadro 4-14 – Deformação do EPS face a uma carga permanente a longo prazo, pela ACEPE e pela BASF .....	42
Quadro 4-15 – Quadro de compatibilidade do EPS, segundo a ACEPE e a BASF .....	44
Quadro 4-16 – Diâmetros correspondentes às percentagens de partículas passadas nos diversos peneiros da espuma de vidro da HASOPOR e MISAPOR .....	49
Quadro 4-17 – Absorção de água da espuma de vidro HASOPOR .....	51
Quadro 4-18 – Teor de água e peso volúmico medidos em aterros realizados com espuma de vidro HASOPOR Light e Standard (Aaboe e Oiseth, 2009).....	52
Quadro 4-19 – Modulo de deformabilidade secante para uma deformação de 2 e 10% da espuma de vidro da marca ARGEX e LECA, segundo várias instituições .....	56
Quadro 4-20 – Deformação a curto e longo prazo de aterros realizados com espuma de vidro (Aaboe e Oiseth, 2009) .....	58

Quadro 5-1 – Número de passagens aconselhadas na execução de um aterro de argila expandida, segundo o equipamento de compactação e a espessura da camada (Reis e Ramos, 2009a) .....	67
Quadro 6-1 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por argila expandida .....	87
Quadro 6-2 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por argila expandida .....	89
Quadro 6-3 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por argila expandida .....	93
Quadro 6-4 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por EPS .....	95
Quadro 6-5 – Quantificação dos ganhos pela substituição do aterro existente por EPS .....	96
Quadro 6-6 – Quantificação dos ganhos pela utilização de espuma de vidro face ao material tradicional .....	97
Quadro 6-7 – Quantificação dos ganhos pela utilização de espuma de vidro face ao material tradicional .....	100
Quadro 6-8 – Quantificação dos ganhos pela utilização de argila expandida face ao material tradicional .....	103
Quadro 6-9 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por espuma de vidro .....	113



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Classificação de materiais leves segundo a sua natureza .....	3
Figura 2-2 – Partículas de argila expandida (Saint-Gobain Weber, 2008) .....	4
Figura 2-3 – Esquema de produção da argila expandida (Reis, 2011a) .....	4
Figura 2-4 – Composição da argila especial, segundo o Triângulo de Riley (1951) .....	5
Figura 2-5 – Grânulos de poliestireno expandido (ACEPE, 2011) .....	6
Figura 2-6 – Esquema de produção do poliestireno expandido .....	7
Figura 2-7 – Blocos de poliestireno expandido produzidos pela TECNOCELL (ACEPE, 2011) .....	7
Figura 2-8 – Partículas de espuma de vidro (Aaobe et al, 2005).....	8
Figura 2-9 – Esquema de produção de espuma de vidro .....	8
Figura 2-10 – Espuma de vidro após saída do forno (Misapor, 2011c).....	9
Figura 3-1 – a) Diagrama de carga e assentamentos para aterro com material tradicional b) Diagrama de carga e assentamentos para aterro com material leve (Reis e Ramos, 2009a) .....	12
Figura 3-2 – Sobrecarga sobre estruturas subterrâneas (Maxit Group, 2011) .....	13
Figura 3-3 – Parede de contenção com enchimento de material leve (Geofoam Research Center, 2011).....	13
Figura 3-4 – Construção de aterro leve permite reduzir as ações horizontais nas fundações adjacentes .....	14
Figura 3-5 – a) Colapso da estrutura do talude b) Utilização de material leve como solução de estabilização de talude .....	15
Figura 3-6 – Drenagem de águas num talude através da utilização de materiais leves .....	15
Figura 3-7 – Proteção de tubagens e serviços com material leve (Construpor, 2005).....	16
Figura 3-8 – Cais com estrutura de cortinas de estacas e enchimento com materiais leves (Maxit Group, 2011) .....	17
Figura 4-1 – Curvas granulométricas da argila expandida LECA 10-20 mm (Saint-Gobain Weber, 2011a).....	20
Figura 4-2 – Curva granulométrica da amostra de LECA 10-20 mm, com compactação “leve” e seca ao ar livre (IST, 2002) .....	21
Figura 4-3 – Curva granulométrica da amostra de LECA 10-20 mm, com compactação “intermédia” e seca ao ar livre (IST, 2002) .....	22
Figura 4-4 – Peso volúmico da argila expandida 10-20 mm face à redução de volume após compactação .....	25
Figura 4-5 – Resistência à compressão face à deformação da argila expandida 10-20 mm, da marca ARGEX e LECA, segundo várias intuições .....	28
Figura 4-6 – Resistência ao corte da argila expandida 10-20mm face as diferentes tensões de confinamento .....	30
Figura 4-7 – Módulo edométrico da argila expandida 10-20 mm da LECA, pelo SINTEF .....	32

Figura 4-8 – Resistência à compressão em função da deformação do EPS para diversos pesos volúmicos, pela ACEPE.....	35
Figura 4-9 – Resistência à compressão em função da deformação do EPS para dois pesos volúmicos, pela BASF.....	35
Figura 4-10 – Resistência à compressão das amostras de EPS retiradas em diversas obras em diferentes datas (Frydenlund e Aaboe, 2001) .....	37
Figura 4-11 – Resistência à flexão do EPS para diversos pesos volúmicos, pela ACEPE e a BASF .	38
Figura 4-12 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade (Negussey, 2011) .....	39
Figura 4-13 – Módulo de deformabilidade para diversos pesos volúmicos do EPS, segundo diversos autores e a BASF .....	40
Figura 4-14 – Deformação dos blocos de EPS face a uma carga permanente, pela BASF .....	41
Figura 4-15 – Deformação dos blocos de EPS face a uma carga permanente, pela ACEPE .....	42
Figura 4-16 – Teor em água para vários pesos volúmicos, segundo a ACEPE e a BASF .....	43
Figura 4-17 – Ensaio de reação ao fogo do EPS (European Manufacturers of Expanded Polystyrene, 2010).....	45
Figura 4-18 – Curva granulométrica da espuma de vidro HASOPOR Standard, com e sem processo de compactação .....	48
Figura 4-19 – Curva granulométrica da espuma de vidro HASOPOR Light, com e sem processo de compactação .....	48
Figura 4-20 – Curvas granulométricas da espuma de vidro MISAPOR 10/50 e 10/75, após processo de compactação .....	49
Figura 4-21 – Peso volúmico da espuma de vidro face ao processo de compactação, pelo NBI .....	50
Figura 4-22 – Resistência à compressão da espuma de vidro da HASOPOR e da MISAPOR .....	53
Figura 4-23 – Resistência ao esmagamento da espuma de vidro da HASOPOR.....	54
Figura 4-24 – Ensaio triaxial estático à espuma de vidro da HASOPOR Standard.....	55
Figura 4-25 – Ângulo de resistência ao corte para diferentes tensões de confinamento da espuma de vidro HASOPOR Standard (Aaobe et al, 2005) .....	55
Figura 4-26 – Módulo edométrico para diferentes tensões verticais da espuma de vidro HASOPOR, pelo NBI.....	57
Figura 4-27 – Deformação da HASOPOR Light face a carregamentos permanentes .....	58
Figura 5-1 – Camião semi-reboque de 25 ton para o transporte de argila expandida (Saint-Gobain Weber, 2009) .....	61
Figura 5-2 – Descarga direta no local de obra da argila expandida (Argex, 2011b) .....	62
Figura 5-3 – Descarga em obra de “bigbags” de argila expandida (Fourré et al, 2009).....	63
Figura 5-4 – Descarga em obra através de bombagem da argila expandida de uma cisterna (Jenner et al, 2009).....	63
Figura 5-5 – Espalhamento da argila expandida através de uma escavadora de rasto (Aaobe et al, 2005).....	64
Figura 5-6 – Espalhamento da argila expandida manualmente com auxílio de ancinhos (Fourré et al, 2009).....	64

Figura 5-7 – Processo de compactação da argila expandida resultante da circulação de escavadoras de rasto (Maxit Group, 2010).....	65
Figura 5-8 – Processo de compactação pela ação dinâmica de equipamentos compactadores na argila expandida (Fourré et al, 2009; Saint-Gobain Weber, 2011d) .....	66
Figura 5-9 – Efeito, em profundidade, das ações produzidas por placas compactadoras sobre a argila expandida (Di Prisco, 2007) .....	66
Figura 5-10 – Tensão vertical registada em profundidade provocada por veículo com 12,5 ton/eixo num aterro de argila expandida (Reis, 2009) .....	68
Figura 5-11 – Confinamento da argila expandida por meio de espaldares de material tradicional (Reis, 2009).....	69
Figura 5-12 – Utilização de geotêxtil de separação na base do aterro de argila expandida (Maxit Group, 2010) .....	69
Figura 5-13 – Confinamento da argila expandida por meio de geotêxtil (Watn et al, 2007; Saint-Gobain Weber, 2011d).....	70
Figura 5-14 – Camião semi-reboque de 25 ton para transporte de blocos de EPS (ATLASEPS, 2011) .....	71
Figura 5-15 – Receção e descarga de 65 m <sup>3</sup> de blocos de EPS (Federal Highway Administration, 2006) .....	72
Figura 5-16 – Transporte dos blocos de EPS do veículo de transporte para a zona de obra (ATLASEPS, 2011).....	72
Figura 5-17 – Instalação de bloco de EPS (ATLASEPS, 2011).....	72
Figura 5-18 – Colocação dos blocos de EPS com juntas horizontais e verticais desencontradas (Arrelano et al, 2011).....	73
Figura 5-19 – Esquema de colocação de blocos de EPS (Construpor, 2005) .....	74
Figura 5-20 – Utilização de garras metálicas como meio de travamento dos blocos de EPS (Spasojevic et al, 2011) .....	75
Figura 5-21 – Camião semi-reboque de 25 ton para o transporte de espuma de vidro (Aaobe et al, 2005).....	76
Figura 5-22 – Descarga direta no local de obra da espuma de vidro (Frydenlund e Aaboe, 2002) .....	77
Figura 5-23 – Descarga em obra de “bigbags” de espuma de vidro (Harley, 2003).....	77
Figura 5-24 – Espalhamento da espuma de vidro através de uma escavadora de rasto (Aaobe et al, 2005).....	78
Figura 5-25 – Processo de compactação da espuma de vidro resultante da circulação de escavadoras de rasto (Frydenlund e Aaboe, 2002).....	79
Figura 5-26 – Utilização de geotêxtil de separação na base do aterro (Maxit Group, 2004) .....	79
Figura 5-27 – Figura da esquerda: cilindro após remoção do solo interior; Figura da direita: película de plástico sobre o cilindro (Norwegian Public Roads Administration, 2007) .....	80
Figura 5-28 – Método de determinação de densidade e teor de água através de um aspirador de vácuo (Caldeira et al, 2009) .....	81
Figura 5-29 – Equipamento FWD (Alltech, 2011) .....	82

Figura 5-30 – Sonda cônica com sensores de medição de carga (Georgia Tech Scholl of Civil & Environmental Engineering, 2011) .....	83
Figura 5-31 – Princípio de funcionamento do penetrómetro Panda (Guedes, 2008) .....	84
Figura 6-1 – Assentamento no encontro de ponte (Moreira et al, 2009) .....	86
Figura 6-2 – Rotação nas extremidades do tramo de margem poente (Moreira et al, 2009) .....	86
Figura 6-3 – Perfil geológico do acesso à Autoestrada do Norte, em Castanheira do Ribatejo.....	88
Figura 6-4 – Perfil transversal tipo do aterro de endentamento com argila expandida .....	89
Figura 6-5 – Perfil transversal tipo das plataformas de transferência de carga com aterro em argila expandida .....	90
Figura 6-6 – Secção transversal tipo dos aterros de pré-carga .....	90
Figura 6-7 – Armazéns na zona da antiga Trefilaria (Pinto et al, 2010) .....	91
Figura 6-8 – Perfil tipo da solução de substituição do aterro existente por argila expandida.....	92
Figura 6-9 – Execução das microestacas no interior dos armazéns (Pinto et al, 2010).....	92
Figura 6-10 – Linha de comboio na zona do aterro com materiais leves (Maxit Group, 2004) .....	94
Figura 6-11 – Solução de reparação da Ponte de Hjelmungen .....	96
Figura 6-12 – Substituição dos solos superficiais do parque subterrâneo do Campo da Agonia por blocos de EPS, Viana do Castelo (Plastimar, 2011a) .....	98
Figura 6-13 – Aspeto final do jardim superficial do parque subterrâneo do Campo da Agonia, Viana do Castelo (Olharvianadocastelo, 2011) .....	98
Figura 6-14 – Modelo de aterro provisório (Watn et al, 2007) .....	99
Figura 6-15 – Secção transversal do aterro leve (Norwegian Public Roads Administration, 2007) ...	100
Figura 6-16 – Anomalias: fissuração do pavimento e inclinação dos postes de iluminação (Roxo et al, 2010) .....	101
Figura 6-17 – Anomalia: deformação das gaiolas constituintes do muro (Roxo et al, 2010) .....	102
Figura 6-18 – Corte da solução de estabilização adotada (Roxo et al, 2010) .....	102
Figura 6-19 – Aspeto do Enchimento com Geoleca (Roxo et al, 2010).....	103
Figura 6-20 – Corte tipo da solução adotada .....	104
Figura 6-21 – Método de conexão das geogrelhas aos blocos de betão (Tensar International Limited, 2008).....	105
Figura 6-22 – Operação de bombagem do material leve desde da margem oposta (Jenner et al, 2009) .....	105
Figura 6-23 – Esquema da estrutura de suporte com material leve .....	106
Figura 6-24 – Aterro de encontro de viaduto com EPS, Rio Janeiro, Brasil (Plastimar, 2011c).....	107
Figura 6-25 – Geossintéticos M3S (Sol Solution - Géotechnique Reseaux, 2011) .....	108
Figura 6-26 – Secção do aterro leve associado ao sistema alveolar de geotêxtil .....	109
Figura 6-27 – Ensaio penetrométrico Panda (Fourré et al, 2009).....	110
Figura 6-28 – Esquema de solução através da substituição do aterro existente por espuma de vidro (Norwegian Public Roads Administration, 2007) .....	111
Figura 6-29 – Descarga e espalhamento da espuma de vidro (Norwegian Public Roads Administration, 2007).....	111

Figura 6-30 – Esquema de solução através da substituição do solo existente por espuma de vidro (Norwegian Public Roads Administration, 2007) .....	112
Figura 6-31 – Espalhamento da espuma de vidro (Frydenlund e Aaboe, 2002) .....	113
Figura 6-32 – Perfil transversal da solução executada .....	113



## ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ACEPE- Associação Industrial do Poliestireno Expandido

AENOR- Autoestradas do Norte

ARGEX- Empresa de fabrico de argila expandida

ASQUAL- *Association Qualité*

BBA- *British Board of Agrément*

CETE- *Centre d'Études Techniques de l'Équipement*

CPT- *Cone Penetration Test*

CPTU- *Piezocone Penetration Test*

DIR-EST- *Direction Interdépartementale des Routes de l'Est*

EPS- *Expanded Poly Styrene*

FWD- *Falling Weight Deflectometer*

GEG- Gabinete de Estruturas e Geotecnia

HASOPOR- Empresa de fabrico de espuma de vidro

IST- Instituto Superior Técnico

LECA- *Lightweight Expanded Clay Aggregate*

LGAI- *Laboratori General d'Assaigs i Investigacions*

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NBI- *Norwegian Building Research Institute*

NPRA- *Norwegian Public Road Administration*

NRRL- *Norwegian Road Research*

PANDA- *Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté*

PEAD- Polietileno de Alta Densidade

PIO- Plano de Instrumentação e Observação

PLLN- Plataforma Logística de Lisboa Norte

SINTEF- *Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning*

SPT- *Standard Penetration Test*



# 1. INTRODUÇÃO

A opção pela elaboração de uma dissertação no âmbito da utilização de materiais leves no domínio das obras geotécnicas partiu do número crescente de aplicações deste tipo de materiais em vários países, nomeadamente em Portugal.

Nos últimos anos, este tipo de materiais leves ganhou uma posição importante na construção civil, não apenas pelas características mecânicas (sobretudo o baixo peso volúmico) mas também pelas características isolantes, térmicas e acústicas. Estes caracterizam-se por um peso volúmico inferior a  $8 \text{ kN/m}^3$  e uma baixa deformabilidade, permitindo, na área da Geotecnia, reduzir assentamentos associados a aterros, reduzir impulsos de terras em estruturas e melhorar a estabilidade de taludes.

A aplicação destes materiais leves pode apresentar vantagens técnicas e económicas face à utilização de materiais tradicionais de aterro. Raramente a sua aplicação é encarada, inicialmente, como a solução para a execução de um aterro, pois são poucos os casos em que não existem materiais naturais ou solos apropriados em quantidade e a distâncias adequadas. Contudo, existem situações em que a utilização de materiais leves, não obstante do seu preço ser superior, possibilita a redução dos custos e dos prazos.

Os materiais leves de aterro nos quais incidiu este estudo são:

- a argila expandida, sendo este, o material mais utilizado a nível nacional;
- o poliestireno expandido, com várias aplicações a nível internacional, mas nenhuma conhecida a nível nacional;
- a espuma de vidro, devido aos seus aspetos inovadores, com uma utilização praticamente exclusiva nos países Nórdicos.

Alguns países, nomeadamente os Nórdicos, têm acumulado uma grande experiência no emprego de materiais leves no domínio da Geotecnia, tendo alcançado bons resultados práticos.

A expansão da utilização destes materiais a outros países, nomeadamente da Europa Central e do Sul, tem encontrado alguns obstáculos devido, fundamentalmente, à ausência de normas associadas a procedimentos construtivos, a técnicas de ensaio e a controlo de execução. Por outro lado, verifica-se que, do ponto de vista teórico, o comportamento mecânico destes materiais leves ainda está pouco estudado, sendo escassos os trabalhos associados à identificação dos valores característicos para os parâmetros mais relevantes no domínio das aplicações geotécnicas.

A dissertação em questão visa apresentar uma contribuição para a divulgação das aplicações geotécnicas deste tipo de materiais, identificando aquelas em que a utilização de materiais leves pode ser vista como uma opção face aos materiais tradicionais, trazendo benefícios para a obra, identificando as vantagens e desvantagens. Pretende-se também, como objetivo principal, resumir a informação disponível sobre as principais características deste tipo de materiais, quantificando os valores mais frequentes para os parâmetros que condicionam o seu comportamento mecânico, para permitir, de forma fundamentada, o cálculo das diferentes aplicações. São ainda apresentados vários

exemplos de utilização destes materiais leves, em Portugal e no estrangeiro, destacando alguns aspetos das técnicas construtivas aplicadas e as vantagens obtidas com a sua utilização.

A presente dissertação está dividida em sete capítulos.

O primeiro capítulo aborda o ponto de partida para a escolha do tema e o objetivo principal que se pretende alcançar com a dissertação.

O segundo capítulo apresenta os três tipos de materiais leves escolhidos para análise, descrevendo o seu processo de fabrico.

O terceiro capítulo apresenta uma descrição dos tipos de aplicações geotécnicas mais frequentes, onde estes materiais são utilizados em alternativa aos materiais tradicionais.

O quarto capítulo resume as principais características mecânicas de cada um dos materiais leves.

O quinto capítulo apresenta uma descrição das características construtivas associadas à aplicação dos materiais leves em estudo e alguns ensaios “in-situ”, utilizados para o controlo de colocação dos mesmos.

O sexto capítulo apresenta obras realizadas com a aplicação destes materiais a nível nacional e internacional.

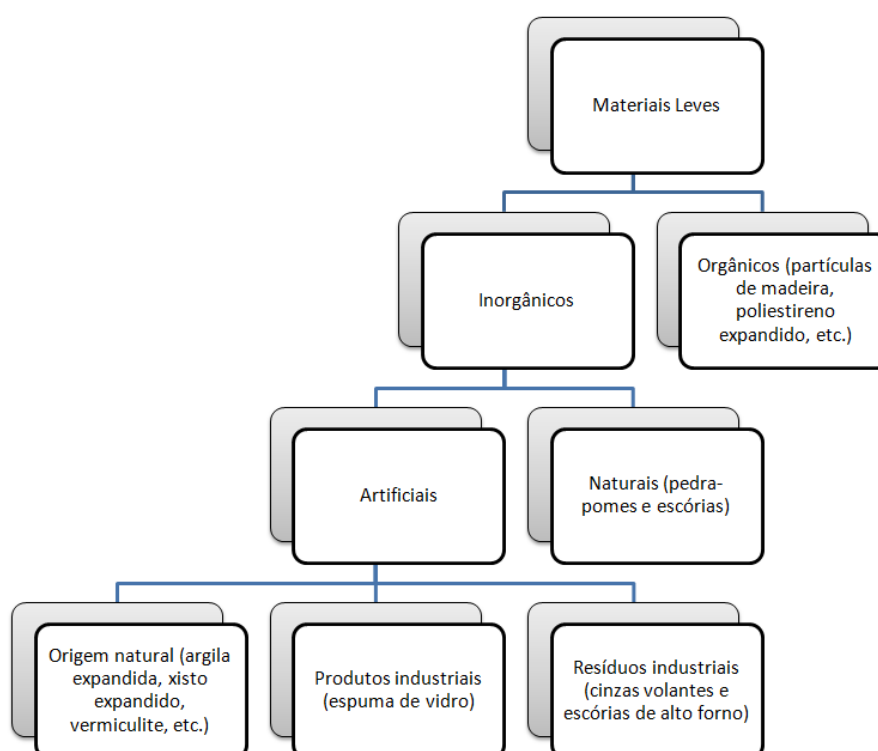
O sétimo, e último capítulo, estabelece as conclusões finais da dissertação, sugerindo também temas interessantes para futuras dissertações.

## 2. TIPOS DE MATERIAIS LEVES E O SEU PROCESSO DE FABRICO

Existem vários tipos de materiais leves que podem ser genericamente utilizados no campo da engenharia civil.

A principal característica destes materiais é a elevada porosidade, resultando num baixo peso volúmico. Os materiais leves podem ser classificados segundo a sua natureza, orgânica e inorgânica. Os materiais inorgânicos dividem-se em materiais naturais e artificiais.

No organograma da Figura 2-1 pode-se observar a classificação dos materiais leves em função da sua origem.



**Figura 2-1 – Classificação de materiais leves segundo a sua natureza**

Como o objetivo principal da dissertação incide na aplicação de materiais leves no ramo da Geotecnia, optou-se pela análise daqueles que são mais comuns nessa área, ou seja: a argila expandida, o poliestireno expandido e a espuma de vidro. De seguida, são apresentados, de forma resumida, estes materiais e os seus processos de fabrico.

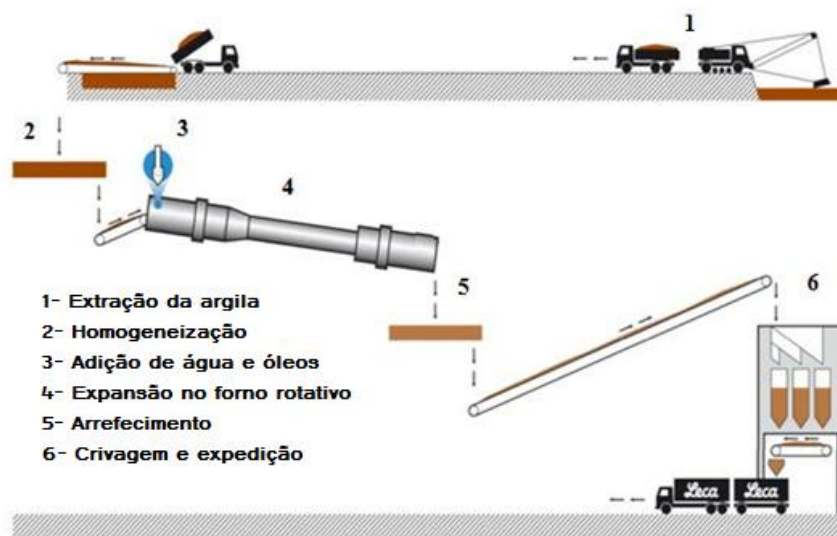
### 2.1. ARGILA EXPANDIDA

A argila expandida é um material leve granular obtido a partir de argilas especiais do tipo *bloating clay*, que possuem a característica de se expandirem quando sujeitas a temperaturas elevadas, até 1150 C° (Figura 2-2) (Maxit Group, 2010; Reis e Ramos, 2009b).



**Figura 2-2 – Partículas de argila expandida (Saint-Gobain Weber, 2008)**

Na Figura 2-3 é apresentado um esquema de produção da argila expandida.



**Figura 2-3 – Esquema de produção da argila expandida (Reis, 2011a)**

Após a extração da argila especial, esta é submetida a um processo de preparação por via húmida, que consiste na elaboração de uma pasta homogênea através da introdução de água (20 a 25% de teor em água) (Silva, 2007). A pasta obtida é transportada e colocada em laminadores, nos quais ocorrerá um esmagamento, ficando esta em partículas de dimensão, com cerca de 1mm de espessura.

Em seguida, serão adicionados numa misturadora água e óleos às partículas, formando uma pasta que será introduzida em fornos rotativos. Os fornos, numa primeira fase, têm como objetivo a secagem da pasta, e em seguida a expansão e formação de grãos de argila expandida (Almeida, 2009).

A alta temperatura do forno permite a ocorrência de reações que resultam na produção e aprisionamento de bolhas de gás no interior do invólucro fundente que virá a constituir a camada exterior das partículas arredondadas do material. Estas partículas, de forma aproximadamente esférica e de dimensões variadas, apresentam assim um interior poroso, responsável pela leveza do material. Por crivagem, podem ser separadas diversas frações granulométricas, adequadas a diferentes aplicações (Reis e Ramos, 2009a).

Posteriormente, as partículas são armazenadas sem grande variação de humidade de modo a constituírem quantidades suficientes para seguirem para a trituradora, fazendo com que o forno trabalhe em contínuo.

Segundo os estudos de Riley (1951) (Al-Bahar e Bogahawatta, 2006), se a composição de uma dada argila estiver contida na área indicada no diagrama triangular da Figura 2-4 significa que é possível a sua utilização como matéria para produzir argila expandida. Para que tal aconteça, o material necessita apresentar uma percentagem de  $\text{SiO}_2$  (dióxido silício) entre 52% e 80%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio) entre 11% e 25% e os fluxos combinados ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) entre 9% e 25%, assegurando assim um comportamento piroclástico, através de uma libertação de gás e aprisionamento desse mesmo no interior do grão (Lorprayoon e Rattanacha, 2005).

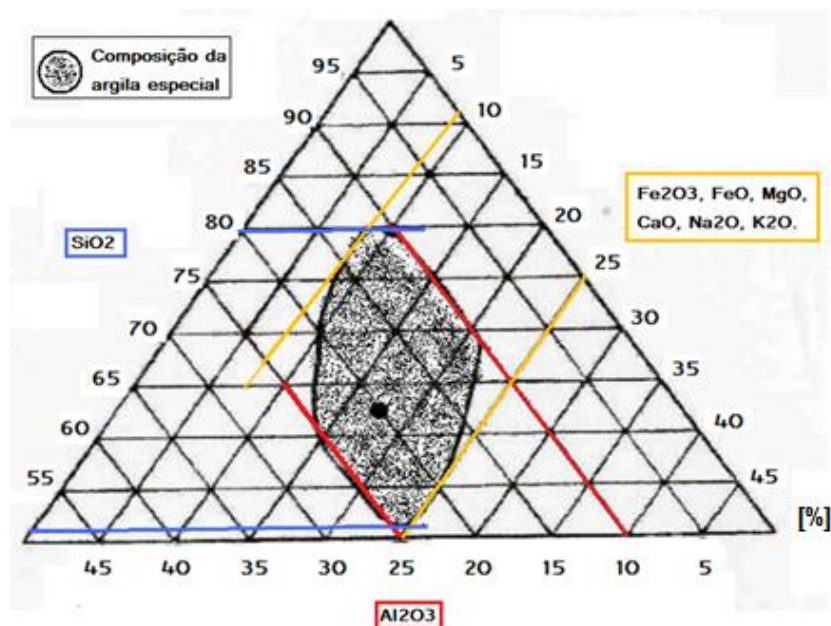


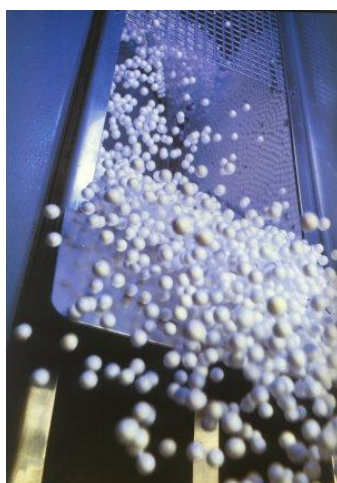
Figura 2-4 – Composição da argila especial, segundo o Triângulo de Riley (1951)

## 2.2. POLIESTIRENO EXPANDIDO

O poliestireno expandido (EPS) é um plástico celular rígido, apresentado sob a forma de pequenos grânulos resultante da polimerização do estireno, sendo derivado de um produto natural: o petróleo (ACEPE, 2011; Frydenlund e Aaboe, 2001).

Quando se adiciona um agente expensor (gás pentano) e água ao estireno, o gás transforma-se numa emulsão, desagregando-se em grânulos de poliestireno (Figura 2-5). Na primeira fase do processo produtivo é usado o vapor de água para expandir a matéria-prima, o pentano dilata-se dentro de cada grânulo, fazendo aumentar o volume inicial das esferas de EPS, compostas de 2% de matéria sólida e de 98% de ar (Sotecnisol, 2011).

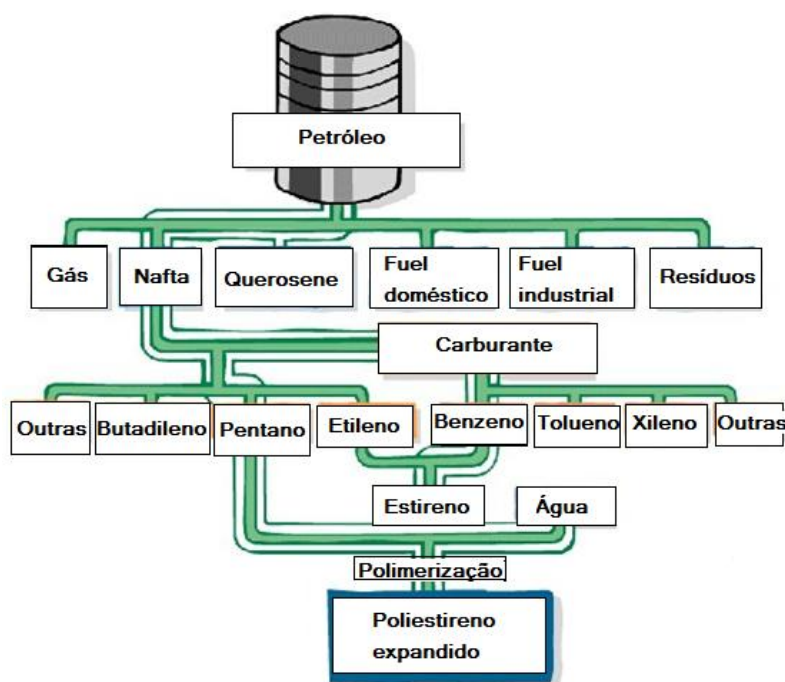
Numa segunda fase do processo, os grânulos repousam algumas horas dentro de silos, para posteriormente serem encaminhados para as máquinas de molde. Por fim, os moldes são atestados com grânulos e submetidos novamente ao vapor de água, que os faz expandir ainda mais. Dado que o molde é um espaço fechado, os grânulos são impossibilitados de se expandirem livremente, resultando na compressão e agregação.



**Figura 2-5 – Grânulos de poliestireno expandido (ACEPE, 2011)**

O novo processo da expansão na câmara é interrompido por arrefecimento, através da projeção de um jacto de água contra as paredes do molde. Isto reduz o excesso de pressão no interior do corpo formado, que poderá ser extraído sem perder a forma original.

Na Figura 2-6 é apresentado um esquema de produção do material de poliestireno expandido.



**Figura 2-6 – Esquema de produção do poliestireno expandido**

No fabrico de poliestireno expandido para utilização no âmbito da Geotecnia produzem-se blocos em grandes moldes, de forma paralelepipedal, variando de dimensões dependendo da fábrica. A título de exemplo, a marca TECNOCELL cria blocos com a dimensão de 4000x1250x500 mm (Figura 2-7).



**Figura 2-7 – Blocos de poliestireno expandido produzidos pela TECNOCELL (ACEPE, 2011)**

### 2.3. ESPUMA DE VIDRO

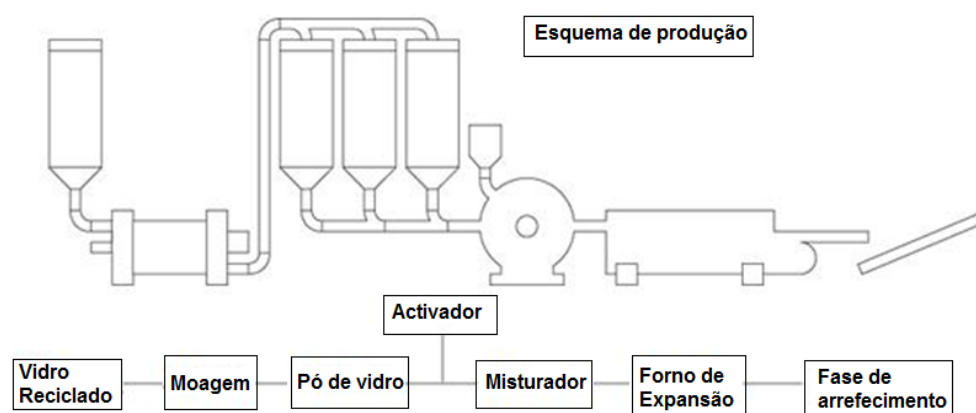
A espuma de vidro (designado por *Foamglass* na literatura anglo-saxónica) é um material leve granular produzido através da reciclagem de vidro proveniente de diversos produtos como, lâmpadas, garrafas de vidro inutilizadas, escória industrial, vidro laminado, entre outros (Figura 2-8) (Frydenlund e Aaboe, 2003).



**Figura 2-8 – Partículas de espuma de vidro (Aaobe et al, 2005)**

A grande vantagem da utilização de vidro reciclado como matéria-prima de materiais para aterros prende-se com o custo relativamente baixo de fabrico (Pokorny et al, 2006). Esta situação ocorre devido à grande quantidade de vidro inutilizado disponível, como também, à pouca quantidade de matéria-prima necessária para obter um volume considerável de espuma de vidro. Porém, podem ocorrer dificuldades de processamento relacionadas com mudanças de composição das matérias-primas, podendo gerar problemas de homogeneidade e reprodutibilidade.

A Figura 2-9 apresenta um esquema de produção da espuma de vidro.



**Figura 2-9 – Esquema de produção de espuma de vidro**



O processo inicia-se com a moagem do vidro reciclado, resultante das diversas fontes de vidro, para o interior de silos nos quais é armazenado. Após ser adicionado um ativador mineral (carboneto de sílica), cerca de 2%, o pó de vidro é introduzido em fornos a uma temperatura entre 700 e 900°C.

Quando exposto a temperaturas elevadas, o pó de vidro expande, deixando o forno com aspeto de vidro esponjoso (Figura 2-10). Ao entrar em contacto com a temperatura exterior, fendilha e separa-se em partículas mais pequenas devido ao choque térmico (Misapor, 2011c).



**Figura 2-10 – Espuma de vidro após saída do forno (Misapor, 2011c)**

Em média, para a produção de 10000 m<sup>3</sup> de espuma de vidro é necessário cerca de 2000 toneladas de vidro.



### 3. TIPOS DE APLICAÇÃO

Os materiais leves apresentam, genericamente, características que permitem que sejam utilizados em diversas aplicações no domínio da engenharia civil, tanto isoladamente, como em adição a certas argamassas e betões.

Na área da construção, estas aplicações são bastante conhecidas, como é o caso da indústria de pré-fabricação (blocos, elementos de aligeiramento de lajes, etc.) e dos enchimentos leves em lajes de edifícios. No ramo da Geotecnia, os materiais leves permitem a execução de aterros, minimizando problemas associados a elevadas cargas verticais ou impulsos horizontais, aliando a essas soluções uma maior rapidez de execução da obra. Estes problemas estão presentes, habitualmente, na construção de estradas, linhas ferroviárias, obras de arte, reabilitação de edifícios entre outros.

De seguida, serão descritas aplicações onde os materiais leves em estudo podem ter um papel fundamental para a resolução de problemas.

#### 3.1. REDUÇÃO DE ASSENTAMENTOS ASSOCIADOS À CONSTRUÇÃO DE ATERROS

Tendo em conta a maior escassez de locais com adequadas condições de fundação para as estruturas a edificar, é hoje em dia cada vez mais frequente a construção de aterros sobre depósitos de solos de baixa resistência à compressão e elevada deformabilidade. Em consequência, é-se frequentemente confrontado com problemas de construções em termos de nivelamento, função e durabilidade.

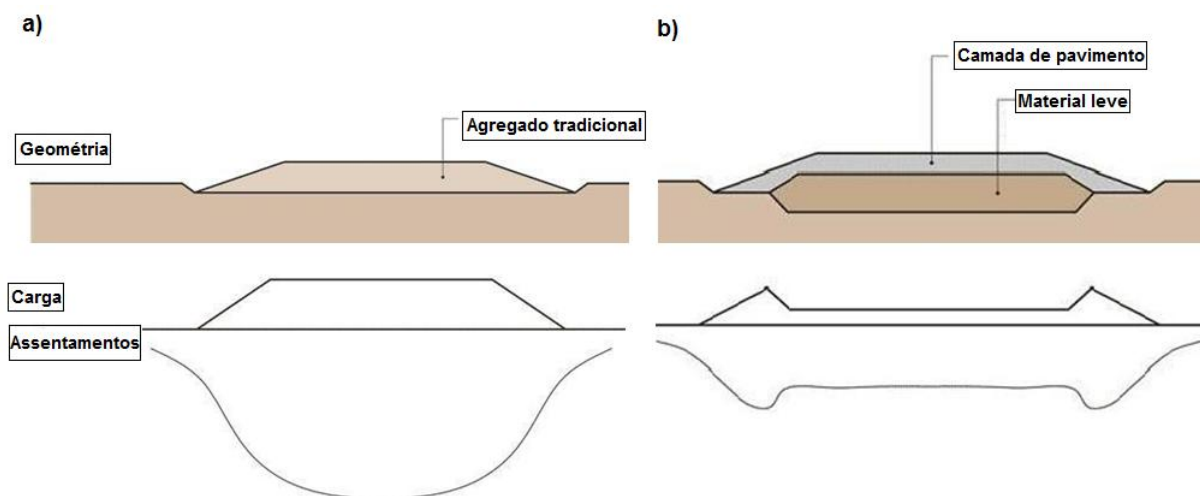
Na resolução deste tipo de problemas, frequentemente associados a elevados assentamentos, as soluções mais utilizadas baseiam-se (Reis e Ramos, 2009a):

- na transmissão de carga a formações mais resistentes por meio de fundações indiretas;
- na aceleração da consolidação empregando drenos verticais e pré-cargas;
- na compactação em profundidade através de vibro compactação (quando se trata de solos granulares);
- em técnicas que permitem aumentar as características do solo da formação menos resistente, ao mesmo tempo que transmitem parte da carga em profundidade, como por exemplo, as colunas de brita.

Todas estas soluções apresentam, em termos de consumo de tempo e aplicação, um fator muito dispendioso. No entanto, ao serem substituídos por materiais leves na construção de aterros, o reforço do subsolo e os longos períodos de assentamento podem ser reduzidos ou até mesmo evitados.

Na Figura 3-1 estão representados os diagramas de carga e de assentamentos finais de um aterro realizado com a utilização de materiais leves e outro com materiais tradicionais. São visíveis as

diferenças entre os dois, para menores cargas corresponderão menores assentamentos devido a consolidação das formações subjacentes ao aterro.

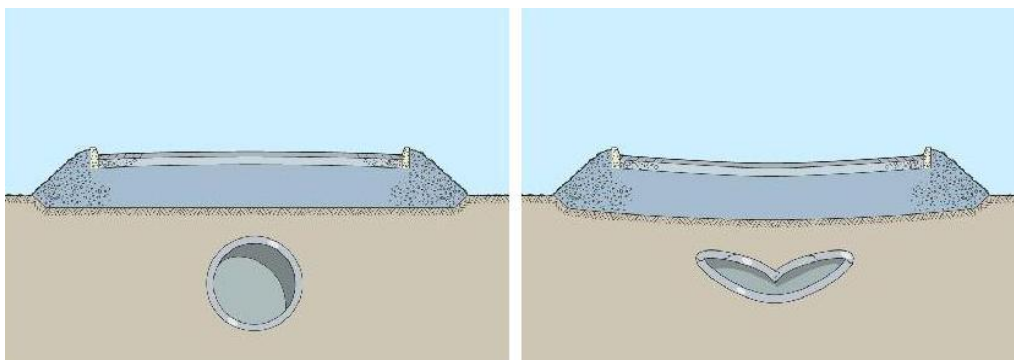


**Figura 3-1 – a) Diagrama de carga e assentamentos para aterro com material tradicional  
 b) Diagrama de carga e assentamentos para aterro com material leve (Reis e Ramos, 2009a)**

Ainda no âmbito da construção de aterros, é de referenciar que a execução de um novo aterro junto a aterros já existentes, tais como, o alargamento de vias ou a adição de uma nova linha ferroviária ou rodoviária, o emprego de um aterro leve permite minimizar os assentamentos diferenciais entre aterros de idades diferentes. A redução do assentamento apresenta um aspeto importante uma vez que as tensões produzidas pelo aterro existente já terão produzido assentamentos ao longo do tempo, ou seja, terão promovido a consolidação da sua fundação, e daí a necessidade de evitar que a parte a construir venha a sofrer assentamentos de carácter diferencial em relação à zona adjacente.

### 3.2. REDUÇÃO DE CARGAS VERTICAIS SOBRE ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS

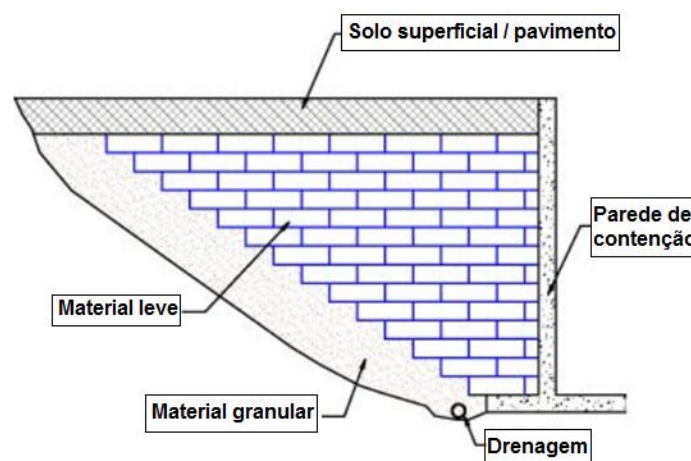
Na execução de construções sobre estruturas subterrâneas (cavidades naturais, condutas, aquedutos, túneis ou galerias) é fundamental avaliar de que forma a magnitude das cargas a transmitir é compatível com as condições de estabilidade dessas estruturas e eventualmente prever a necessidade de considerar algum tipo de reforço (Foam-Control, 2011). Nestas condições, a utilização de materiais leves permite a construção de aterros, aligeirando consideravelmente a carga a transmitir às estruturas (Figura 3-2), reduzindo ou mesmo eliminando os custos associados à implementação de eventuais soluções de reforço (do solo ou da estrutura enterrada). O esquema da Figura 3-2 representa o colapso de uma estrutura enterrada motivado pela construção de um aterro.



**Figura 3-2 – Sobrecarga sobre estruturas subterrâneas (Maxit Group, 2011)**

### 3.3. REDUÇÃO DOS IMPULSOS HORIZONTAIS SOBRE ESTRUTURAS

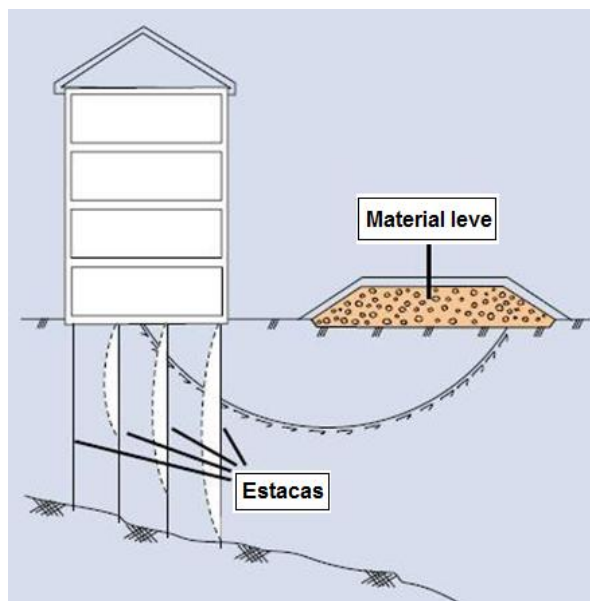
Na realização de trabalhos que impliquem a aplicação de sobrecarga no tardo de estruturas existentes, para a qual elas não foram dimensionadas, poderá ser necessário proceder ao reforço da estrutura, o que pode implicar a aplicação de técnicas morosas e dispendiosas (Geofoam Research Center, 2011). Em alternativa, a utilização de materiais leves é vista como uma solução. Com base no baixo peso volúmico, no elevado ângulo de atrito (características mecânicas que são referidas no capítulo 4) e na inexistência de pressões hidrostáticas devido às características drenantes (exceto o EPS), é fácil concluir que o impulso será inferior do que aquele que seria provocado por materiais tradicionais. Assim, eventuais acréscimos de carga, originadas pelas novas construções no tardo das estruturas podem ser compensados pela redução dos impulsos horizontais devido ao aterro leve no tardo (Figura 3-3).



**Figura 3-3 – Parede de contenção com enchimento de material leve (Geofoam Research Center, 2011)**

Em estruturas de contenção novas, a redução dos impulsos horizontais resultantes da aplicação de materiais leves no tardo pode permitir ganhos económicos significativos, associados à redução das dimensões estruturais (Maxit Group, 2011).

As ações horizontais provocadas pela construção de aterros são igualmente relevantes sobre elementos de fundação profundos de estruturas adjacentes a esses aterros (Figura 3-4).



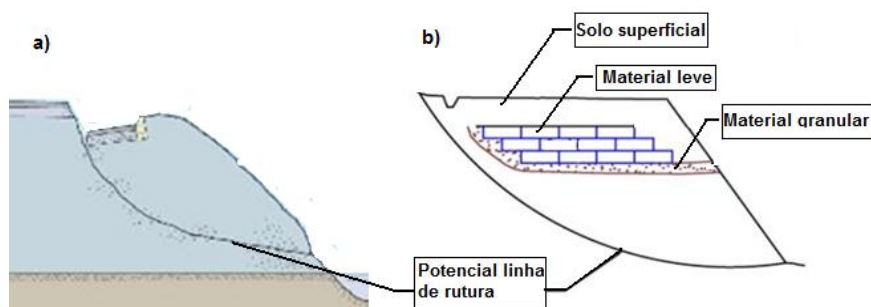
**Figura 3-4 – Construção de aterro leve permite reduzir as ações horizontais nas fundações adjacentes**

A execução do aterro com materiais leves permite uma redução das cargas a transmitir à fundação e, deste modo, diminuir as ações horizontais sobre as estacas. Dentro deste âmbito, uma outra situação corrente é a dos encontros de pontes executados sobre estacas, dado que em zona contígua a estas, é sempre normal a construção de aterros de aproximação. A execução destes aterros com materiais leves permite a redução das ações horizontais sobre a fundação do encontro.

### 3.4. MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de um talude está diretamente associada ao uso das terras envolvidas e às pressões intersticiais que estejam instaladas (Geofoam Research Center, 2011). A substituição ou incorporação de materiais leves no solo existente nesse talude permite a redução do seu peso total. Por outro lado, as capacidades drenantes de alguns materiais leves podem permitir uma melhor dissipação das pressões intersticiais que se possam vir a instalar no talude.

Neste caso, o material leve, em vez de ser aplicado como aterro comum, é utilizado como reforço, reduzindo o risco de instabilidade no talude. A utilização de materiais leves no aumento de estabilidade de taludes pode ocorrer sem necessidade de modificação da geometria do talude (Figura 3-5).

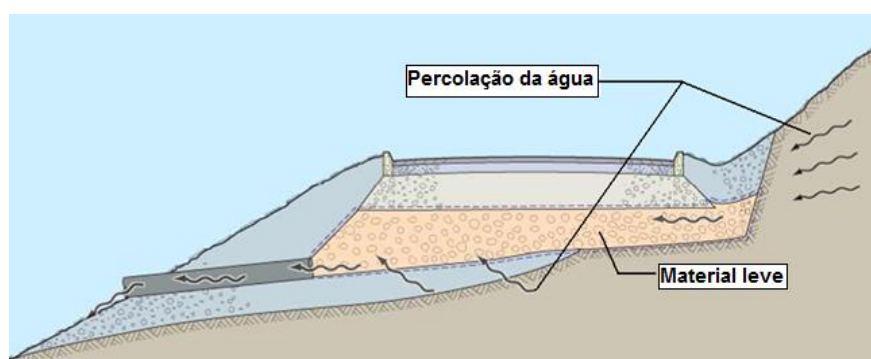


**Figura 3-5 – a) Colapso da estrutura do talude b) Utilização de material leve como solução de estabilização de talude**

### 3.5. APLICAÇÃO EM CAMADAS DE DRENAGEM

A existência de um escoamento eficiente em zonas particulares de construções pode evitar a perda das propriedades de capacidade de carga, provocadas pela água, e assegurar uma boa capacidade de carga ao longo da vida útil da construção (Maxit Group, 2011).

Em terrenos de taludes, os fluxos de água subterrânea podem provocar danos por erosão e reduzir a resistência dos solos. A utilização de materiais leves, tais como os referenciados neste estudo, com exceção ao poliestireno expandido que em aplicações desta natureza não detém capacidade de drenagem, permite interceptar a água, direcionando-a através das camadas estruturais para declives, valas laterais, drenos subterrâneos e fossas de drenagem (Figura 3-6). Este efeito de drenagem pode também ser importante na zona envolvente de construções, podendo minimizar os impactos negativos de presença da água no comportamento global dessas construções.

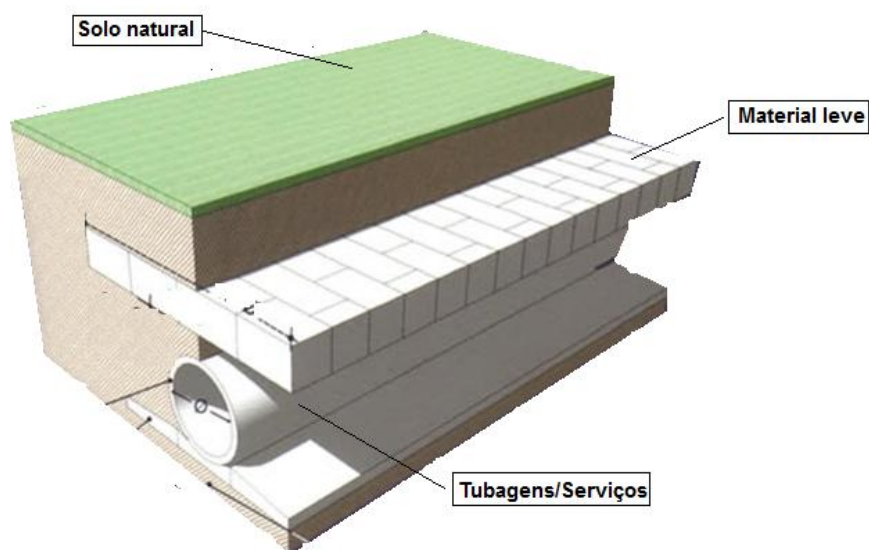


**Figura 3-6 – Drenagem de águas num talude através da utilização de materiais leves**

### 3.6. PROTEÇÃO DE TUBAGENS E SERVIÇOS

Os materiais leves em estudo podem ser utilizados como proteção leve envolvendo as tubagens e serviços, produzindo uma redução da carga sobre os solos subjacentes, diminuindo a probabilidade de um assentamento irregular que danifique essas tubagens (Norwegian Public Roads Administration, 2007).

O envolvimento das tubagens e serviços com materiais leves representa uma solução de simples execução e uma alternativa à areia tradicional utilizada para suportar e isolar esses serviços (Figura 3-7).



**Figura 3-7 – Proteção de tubagens e serviços com material leve (Construpor, 2005)**

### 3.7. PROTEÇÃO CONTRA O GELO

Em climas frios, na realização de vias de comunicação, as camadas betuminosas constituintes da via podem ter que possuir uma espessura considerável, de modo a evitar o gelo nas subcamadas, e os consequentes efeitos negativos na resistência do solo (uma vez que a água ao congelar aumenta de volume) (Hasopor, 2011).

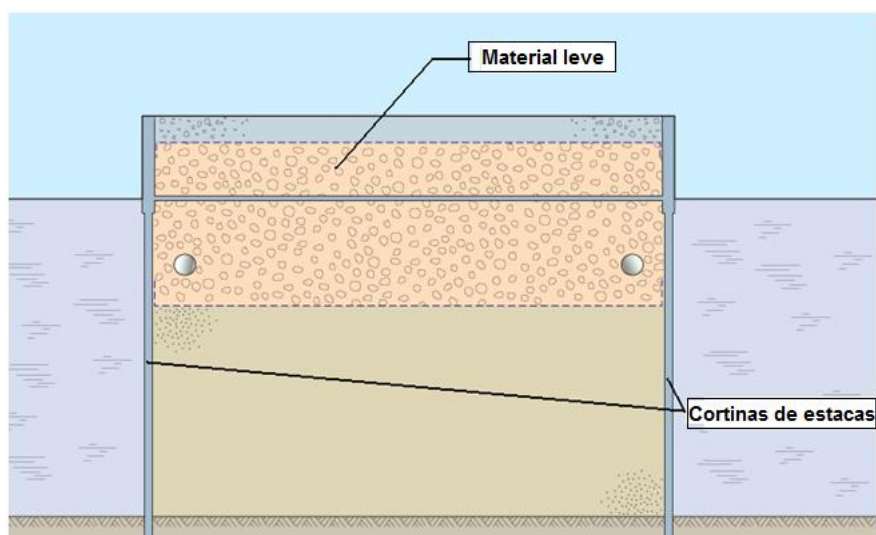
A utilização dos materiais leves permite solucionar ou reduzir o risco desses fatores danosos, devido à capacidade de isolamento a temperaturas baixas em comparação com os materiais minerais nas camadas estruturais.

### 3.8. CONSTRUÇÃO DE CAIS

Na construção de cais, pontes e ancoradouros é frequente encontrarem-se na fundação deficientes condições geotécnicas, muitas vezes associados à presença de materiais de fraca resistência ao corte e elevada deformabilidade (Hasopor, 2011).

Com o recurso a materiais leves para o enchimento do volume entre as estruturas dos muros cais (Figura 3-8) pode ser minimizados os impactos negativos das fracas características geotécnicas dos solos de fundação.





**Figura 3-8 – Cais com estrutura de cortinas de estacas e enchimento com materiais leves (Maxit Group, 2011)**



## 4. CARATERÍSTICAS DOS MATERIAIS LEVES

A informação existente relativa à caracterização do comportamento mecânico dos materiais leves, necessária para obras geotécnicas, é escassa, sendo que a maioria das aplicações foram realizadas sem estudos laboratoriais exaustivos.

Os países Nórdicos apresentam uma vasta experiência, superior a 50 anos, na utilização de materiais leves em aplicações geotécnicas, fundamentalmente, com base na prática adquirida em obras anteriores. Os poucos ensaios laboratoriais realizados surgem como tentativa de exportar a técnica para outros países onde a prática geotécnica assenta numa maior necessidade de validação por cálculo das soluções propostas. Em Portugal, um exemplo disso, é o caso da argila expandida, submetida a estudos de caracterização do comportamento mecânico por parte do LNEC e do IST, no âmbito da Geotecnia.

O poliestireno expandido e a espuma de vidro não possuem nenhum estudo de caracterização a nível nacional por parte de uma instituição de investigação, apenas existe uma associação, a ACEPE, que visa incentivar e implementar normas de qualidade na utilização do EPS, tal como, a nível europeu, a EUMEPS.

Assim, no Capítulo 4 procura-se dar uma contribuição para a caracterização do comportamento mecânico dos materiais leves em estudo, reunindo a informação mais relevante.

### 4.1. ARGILA EXPANDIDA

#### 4.1.1. GRANULOMETRIA

A análise granulométrica consiste na distribuição das partículas de um dado material segundo dimensões (EN 933-1, 2000). O ensaio é realizado através da peneiração, por meio de um conjunto de peneiros, de um material em diversas classes granulométricas. O conjunto de peneiros é disposto por ordem de modo a que os de malha mais larga estejam na parte superior e os de malha mais apertada na inferior.

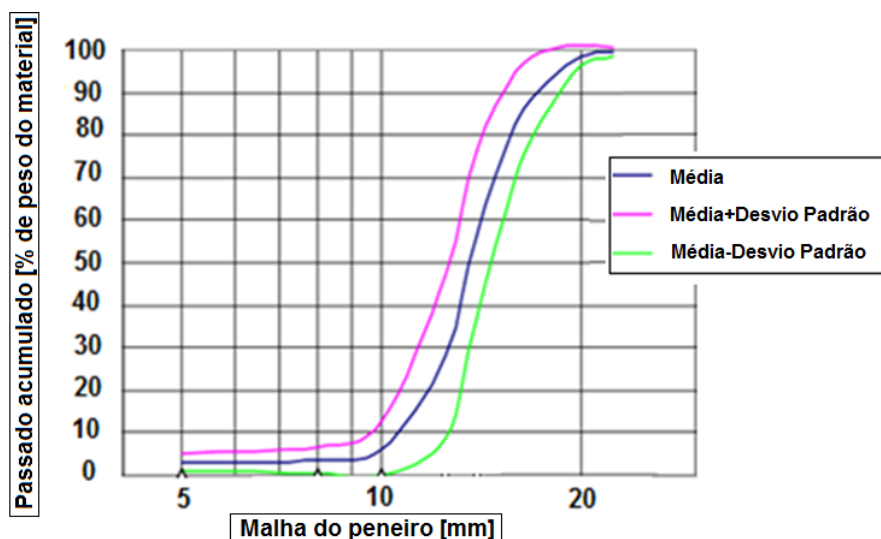
A argila expandida apresenta em regra uma granulometria extensa. Este material é comercializado em Portugal com dimensões entre 0-2 mm, 2-4 mm, 3-8 mm, 8-16 mm e 10-20 mm pela marca ARGEX e 1-5 mm, 0-32 mm, 4-12.5 mm e 10-20 mm pela marca Saint-Gobain Weber, sob a designação de LECA (Argex, 2011c; Reis e Ramos, 2009a).

Os materiais com maiores frações de finos são, particularmente, utilizados como agregados para o fabrico de argamassas e betões (Reis, 2009). Porém, no ramo da Geotecnia, existem razões que levam a ser preferível a utilização de uma fração sem finos, e em particular a 10-20 mm. Uma das razões provém do facto que a maior dimensão das partículas permite o aumento do volume de espaços vazios entre elas, diminuindo a densidade do material. Outra advém da maior expansão das partículas, contendo, por conseguinte, maior volume de vazios no interior das mesmas. O material

sendo mais leve, consegue-se maior eficiência em termos de aligeiramento do aterro e em termos de transporte, advindo daí vantagens desta fração mais grossa relativamente às mais finas.

### GRANULOMETRIA À SAÍDA DA FÁBRICA

A Figura 4-1 apresenta as curvas granulométricas da argila expandida de fração 10-20 mm da marca LECA à saída da fábrica (Saint-Gobain Weber, 2011a), determinadas segundo a norma NP EN 933-1 após 217 ensaios efetuados em 1736 amostras recolhidas durante o ano 2010.



**Figura 4-1 – Curvas granulométricas da argila expandida LECA 10-20 mm (Saint-Gobain Weber, 2011a)**

A ARGEX, segundo a mesma norma, apresenta a análise granulométrica da argila expandida 10-20 mm com uma percentagem de 15% (em peso) de partículas com dimensões inferiores a 10 mm e 90% de partículas com dimensões inferiores a 20 mm (Argex, 2011a).

### GRANULOMETRIA APÓS COMPACTAÇÃO

Em 2002, o Laboratório de Geotecnia do Instituto Superior Técnico, a pedido da LECA Portugal (marca designada na data, sendo agora de Saint-Gobain Weber Portugal), realizou ensaios laboratoriais de caracterização da argila expandida LECA, de granulometria 2-20 mm e 10-20 mm (IST, 2002) (Caldeira et al, 2009).

Verificou-se que os dois tipos de materiais depois de compactados apresentam uma granulometria muito idêntica, tendo sido apenas realizados os ensaios de caracterização mecânica no material 10-20 mm.

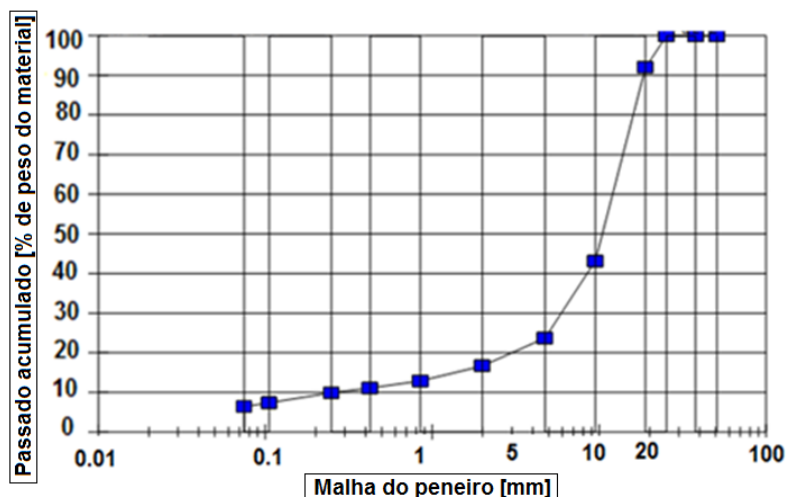
O ensaio de análise granulométrica foi realizado por peneiração húmida seguindo a norma E 239-1970, e por peneiração e sedimentação, segundo a norma E 197-1966.

O processo de compactação foi executado com o uso do pilão, sendo o principal objetivo a determinação da redução do volume da amostra quando sujeita à energia de compactação.

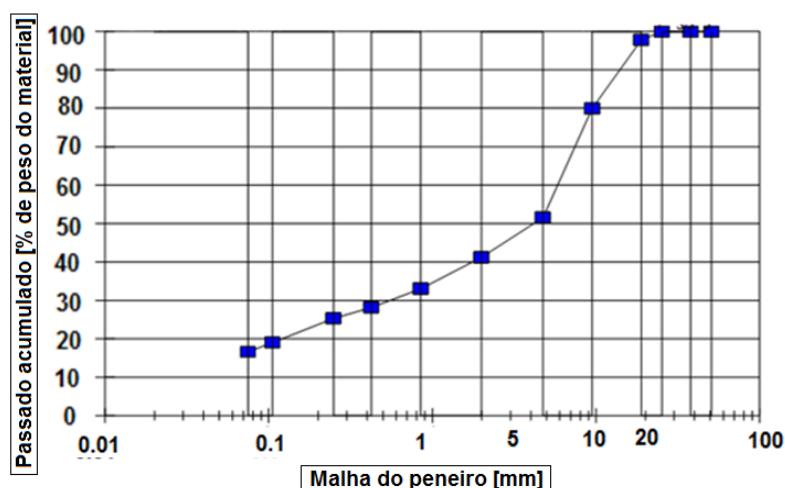
A compactação “leve” foi realizada através de 3 camadas de material com 55 pancadas em cada camada com o pilão leve. A compactação “intermédia” foi realizada através de 3 camadas de material com 55 pancadas em cada camada com o pilão pesado. A compactação “pesada” foi realizada através de 5 camadas de material com 55 pancadas em cada camada com o pilão leve. Através dos pesos volúnicos pesados nos três estados de compactação foi possível determinar uma redução de volume de 23% para o processo de compactação “leve”, de 46% para o processo de compactação “intermediário” e de 59% para o processo de compactação “pesada”.

A percentagem de finos (material que passa no peneiro #200), após a utilização do equipamento de compactação, permitiu identificar a fragmentabilidade dos materiais ensaiados, obtendo-se valores de cerca de 7%, 17% e 22% (percentagem de finos) para as energias de compactação “leve”, “intermédia” e “pesada”, respetivamente.

As Figuras 4-2 e 4-3 apresentam as análises granulométricas do material leve LECA 10-20 mm seco ao ar para uma energia de compactação “leve” e “intermédia”, respetivamente.



**Figura 4-2 – Curva granulométrica da amostra de LECA 10-20 mm, com compactação “leve” e seca ao ar livre (IST, 2002)**



**Figura 4-3 – Curva granulométrica da amostra de LECA 10-20 mm, com compactação “intermédia” e seca ao ar livre (IST, 2002)**

Pela análise das Figuras 4-2 e 4-3 pode observar-se que o aumento da energia de compactação reduz globalmente a granulometria do material, aumentando deste modo a percentagem de finos contidos no material. É também possível constatar uma maior inclinação da curva granulométrica na compactação leve face a intermédia, existindo uma maior uniformidade dos grãos, particularmente para o intervalo entre os 10 e 20 mm.

Através da análise granulométrica fornecida pela ARGEX e pelas Figuras 4-1, 4-2 e 4-3 podem retirar-se os diâmetros correspondentes às percentagens de 10%, 15%, 60% e 90% de partículas passadas nos diversos peneiros (Quadro 4-1).

**Quadro 4-1 – Diâmetros correspondentes às percentagens de partículas passadas nos diversos peneiros para a argila expandida 10-20 mm da ARGEX e da LECA**

<b>Argila expandida 10-20 mm</b>		<b><i>Diâmetro das partículas [mm]</i></b>			
		<b><i>Percentagem de partículas passadas</i></b>			
		10%	15%	60%	90%
<i>Granulometria à saída da fábrica (Saint-Gobain Weber 2011a)</i>		<11	<12	<15	<20
<i>Granulometria à saída da fábrica (Argex, 2011a)</i>		-	<10	-	<20
<i>Granulometria após compactação (IST, 2002)</i>	<i>Energia de compactação leve<sup>1</sup></i>	<0,4	<2	<12,5	<20
	<i>Energia de compactação intermédia<sup>2</sup></i>	-	<0,05	<8	<15

<sup>1</sup> A compactação “leve” é realizada através de 3 camadas de material com 55 pancadas em cada camada com o pilão leve.

<sup>2</sup> A compactação “intermédia” é realizada através de 3 camadas de material com 55 pancadas em cada camada com o pilão pesado.

Como é possível constatar pelo Quadro 4-1, tanto a LECA como a ARGEX apresentam valores muito idênticos quanto à análise granulométrica da argila expandida 10-20 mm à saída da fábrica, possuindo cerca de 90% de partículas com dimensões superiores a 10 mm e 90% de partículas inferiores a 20%, confirmando a sua granulometria de 10-20 mm.

A argila expandida 10-20mm quando sujeita a processos de compactação aumenta a percentagem de finos, como já foi referido, sendo possível confirmar pelos resultados do IST, em que o material com uma energia de compactação intermédia possui cerca de 60% de partículas com tamanho inferior a 8mm, aumentando o seu peso volúmico.

#### 4.1.2. PESO VOLÚMICO

O peso volúmico apresenta um papel determinante para a caracterização do comportamento mecânico da argila expandida, na medida que a principal mais-valia na utilização de materiais leves no ramo da Geotecnia é o reduzido peso volúmico.

##### PESO VOLÚMICO À SAÍDA DA FÁBRICA

Atualmente a ARGEX e a LECA apresentam valores de peso volúmico à saída de fábrica para a fração 10-20 mm, após realização do ensaio segundo a norma EN 1097-3, de 2,97kN/m<sup>3</sup> e 2,75kN/m<sup>3</sup>, respetivamente, com uma tolerância de  $\pm 15\%$  (Argex, 2011b; Reis e Ramos, 2009a; EN 1097-3, 1998).

##### PESO VOLÚMICO APÓS COMPACTAÇÃO

A caracterização mecânica realizada à argila expandida LECA 10-20 mm pelo Laboratório de Geotecnia do IST permitiu determinar o valor do peso volúmico do material leve, perante as três energias de compactação já referidas (Quadro 4-2) (IST, 2002). O processo de compactação realizado é definido pela redução do volume da amostra através da utilização do pilão, definida de forma percentual.

**Quadro 4-2 – Peso volúmico da argila expandida LECA 10-20 mm, solta e compactada com diversas energias, pelo IST**

	<b>Peso volúmico seco [kN/m<sup>3</sup>]</b>			
	<i>À saída da fábrica</i>	<i>Redução de volume</i>		
		<i>Energia Leve</i> 23%	<i>Energia Intermédia</i> 46%	<i>Energia Pesada</i> 59%
<i>Argila expandida LECA 10-20 mm (IST, 2002)</i>	2,90	3,7	5,0	5,9

Em 2003, o LNEC, a pedido da LECA, realizou ensaios triaxiais ao material leve de argila expandida, tendo os provetes ensaiados compactados em laboratório através de uma placa vibradora com amplitude e frequência determinadas (sem conhecimento do tempo de vibração), resultando num peso volúmico, aproximadamente, de  $4,5 \text{ kN/m}^3$  (Caldeira, 2003).

Em 2008, no âmbito de uma operação de caracterização mecânica do material de argila expandida para obras geotécnicas, o SINTEF submeteu as amostras de LECA 10-20 mm produzidas em Portugal (Avelar) a diversos ensaios, incluindo ensaios de compactação por vibração. O equipamento de compactação utilizado foi uma placa vibratória com amplitude e frequência determinadas. O processo de compactação realizado é definido pela redução do volume da amostra através do tempo utilização da placa, definida de forma percentual.

O Quadro 4-3 apresenta os valores do peso volúmico alcançados pelo SINTEF (Caldeira et al, 2009; Reis e Ramos, 2009a).

**Quadro 4-3 – Peso volúmico da argila expandida LECA 10-20 mm, solta e compactada, pelo SINTEF**

	<b>Peso volúmico seco [kN/m<sup>3</sup>]</b>		
	<i>À saída da fábrica</i>	<i>Redução de volume</i>	
		11.5%	14%
<i>Argila expandida LECA10-20mm (Caldeira et al, 2009)</i>	2,32	2,71	2,80

Em 2011, o LGAI realizou ensaios de compactabilidade e capacidade de carga a três amostras de argila expandida 10-20 mm da ARGEX, tendo sido possível quantificar o seu peso volúmico para um determinado nível de compactação (Quadro 4-4) (LGA Technological Center, 2011).

O ensaio é executado segundo a norma EN 13055-2, regularizando o funcionamento do equipamento de vibração para uma amplitude e frequência determinadas (EN 13055-2, 2004).

O ensaio de compactabilidade e capacidade de carga é constituído por duas partes. Na primeira parte é medida a redução de volume na amostra de material leve após três minutos de vibração. Na segunda parte do ensaio, a amostra é sujeita a uma carga axial de compressão aplicada incrementalmente a uma taxa de  $0,06 (\pm 0,002) \text{ kN/s}$ , até se alcançar uma deformação de 10% na altura da amostra após compactação por vibração.

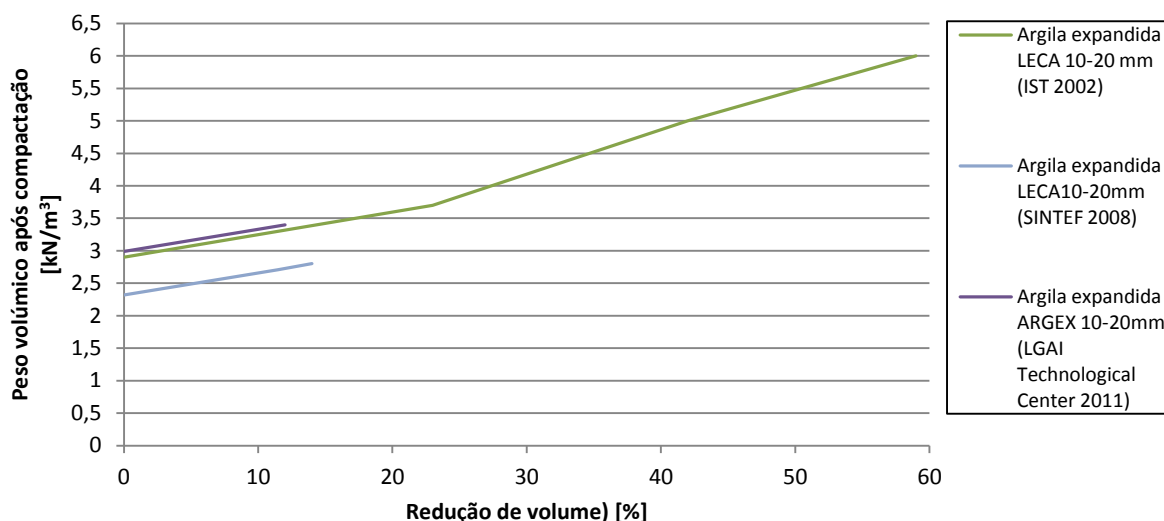
**Quadro 4-4 – Peso volúmico da argila expandida ARGEX 10-20 mm, solta e compactada, pelo LGAI**

	<b>Peso volúmico seco [kN/m<sup>3</sup>]</b>	
	<i>À saída da fábrica</i>	<i>Redução de volume</i>
		12%
<i>Argila expandida ARGEX 10-20 mm (LGA Technological Center, 2011)</i>	2,99	3,40



Os ensaios de caracterização da argila expandida realizados pelo SINTEF, o LNEC e o LGAI utilizaram equipamentos de compactação diferente do IST. A variação da energia imposta no ensaio com a placa vibratória é dependente do tempo de funcionamento da mesma. Enquanto, a utilização do pilão varia com o seu peso, o número de pancadas e o número de camadas.

De modo a compararmos a importância da compactação no peso volúmico realizou-se o gráfico da Figura 4-4, segundo os Quadros 4-2, 4-3 e 4-4.



**Figura 4-4 – Peso volúmico da argila expandida 10-20 mm face à redução de volume após compactação**

O peso volúmico solto das argilas expandidas ensaiadas possuem alguma disparidade, justificada pela diferente marca e data de produção do material, sendo natural uma evolução no processo de fabrico.

Através da Figura 4-4 é possível confirmar o comportamento do agregado de argila expandida 10-20 mm face à compactação. Apesar das três instituições utilizarem diferentes pesos volúricos à saída da fábrica e diferentes processos de compactação, apresentam a mesma evolução do seu peso volúmico, sendo possível avançar um aumento do peso volúmico médio de 12% para uma redução do volume de 10% (entre as amostras das três instituições).

Em conclusão, é possível confirmar o aumento do peso volúmico da argila expandida 10-20 mm face ao valor à saída da fábrica, após processo de compactação em obra, aumentando a sua densidade relativa por diminuição do índice de vazios, pelo que advirá um aumento do peso volúmico em geral de 10%.

### PESO VOLÚMICO SUBMERSO

Na determinação da percentagem de absorção de água da argila expandida produzida pela ARGEX e a pela LECA, realizaram-se ensaios segundo a norma EN 1097-6, resultando nos valores,

após 24 horas de imersão, de 22,8% e de 38% da massa seca, respetivamente. Os valores apresentam alguma discrepância, justificada pela origem distinta da matéria-prima. A forma como evolui a absorção de água varia em função da quantidade de água já absorvida, sendo necessário cerca de 3 meses para duplicar os valores obtidos após 24h de imersão (Saint-Gobain Weber, 2011b).

A completa saturação apenas se consegue em condições laboratoriais, através da imposição de vácuo em câmara estanque e da introdução de água com a bomba de vácuo ainda em funcionamento.

Com base no referido, o peso volúmico aumentará após a aplicação, dependendo da maior ou menor presença de água. Assim, em situações nas quais a presença de água é transitória, o aumento de peso volúmico a considerar para pré-dimensionamento será de 25%. Já em situações em que a presença de água pode ter um carácter de quase permanência, é de considerar a completa saturação do material, pelo que o aumento será na ordem de 50%.

### VALOR DE PROJETO

Em conclusão, atendendo aos fatores de majoração de 1,10, por aumento do peso volúmico por compactação e de 1,25 ou 1,50 por absorção de água, pode-se considerar um peso volúmico, para a argila expandida 10-20 mm, entre 4 e 5 kN/m<sup>3</sup>. Os valores obtidos poderão ser tratados como valores característicos, pois a variação do peso volúmico e de absorção de água dão-se em sentidos opostos. Para pesos volúmicos elevados, o volume de vazios diminui pelo que também a absorção de água diminui.

#### 4.1.3. RESISTÊNCIA

A caracterização mecânica da argila expandida segue a pré-norma prEN 15732 (*“Light weight fill and thermal insulation products for civil engineering applications (CEA) – Expanded clay lightweight aggregate products”*) e a norma EN 13055-2 (*“Materiais leves. Parte 2: Materiais leves para misturas betuminosas e tratamentos superficiais, e aplicações em camadas de materiais não ligados ou ligados”*).

A prEN 15732 abrange a aplicação do material de argila expandida na construção em geral (Saint-Gobain Weber, 2011a; Argex, 2011a).

A norma EN 13055-2 é aplicada a materiais leves com destino de serem utilizados em sub bases de pavimentos rodoviários e ferroviários.

### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Atendendo que em obra o processo de compactação necessário na aplicação do material provoca uma redução da espessura das diversas camadas em cerca 10 %, o ensaio de capacidade

de carga procura conhecer o comportamento da tensão/deformação existente num aterro leve face a esse nível de compactação inicial.

O ensaio de capacidade de carga realizado pelo SINTEF na argila expandida 10-20 mm da LECA incidiu em duas compactações iniciais diferentes: uma redução de volume inicial de 11,5%, através do funcionamento do equipamento de vibração durante 60 seg, e de 14%, através do funcionamento do equipamento de vibração durante 180 seg (Reis e Ramos, 2009a). Em ambos os casos, a compactação realizada procura reproduzir as condições em obra, conduzindo a reduções da espessura do material da ordem de 10%. Segundo o ensaio referido foi possível determinar a evolução da sua resistência à compressão face à redução de volume (Quadro 4-5).

**Quadro 4-5 – Resistência à compressão da argila expandida 10-20 mm da LECA, pelo SINTEF**

LECA 10-20 mm	Redução de volume [%]	Resistência à compressão [kPa]	
		Deformação de 2%	Deformação de 10%
Amostra 1	11.5	200	450
Amostra 2	14	240	540

O Quadro 4-6 expõe os valores de resistência à compressão da argila expandida 10-20 mm da ARGEX, determinados através do ensaio de capacidade de carga, para uma compactação inicial também próxima dos 10% (LGA Technological Center, 2011).

**Quadro 4-6 – Resistência à compressão da argila expandida 10-20 mm da ARGEX, pelo LGAI**

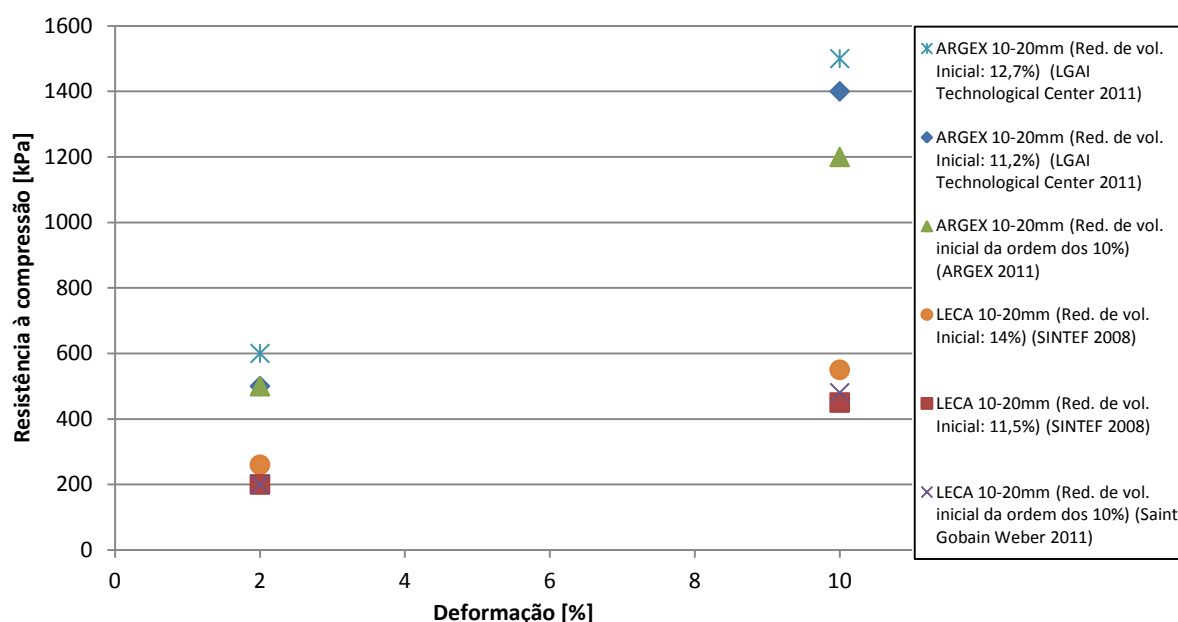
ARGEX 10-20 mm	Redução de volume [%]	Resistência à compressão [kPa]	
		Deformação de 2%	Deformação de 10%
Amostra 1	11.2	500	1400
Amostra 2	12.7	600	1500
Amostra 3	12.3	600	1500

No Quadro 4-7 encontram-se representados os valores para a resistência à compressão da argila expandida 10-20 mm, segundo a norma EN 13055-2, anunciado pelas marcas ARGEX e LECA. A resistência à compressão apresentada prevê uma compactação inicial no processo de aplicação em cerca de 10% da espessura da camada.

**Quadro 4-7 – Resistência à compressão de 2% e 10% da argila expandida 10-20 mm, anunciadas pela ARGEX e a LECA**

	Resistência à compressão [kPa]	
	Deformação 2%	Deformação 10%
ARGEX 10-20 mm (Argex, 2011b)	≥500	≥1200
LECA 10-20 mm (Saint-Gobain Weber, 2011a)	≥200	≥480

Na Figura 4-5 pode-se analisar as resistências à compressão referidas anteriormente pelas várias instituições, da argila expandida 10-20 mm da marca ARGEX e LECA.



**Figura 4-5 – Resistência à compressão face à deformação da argila expandida 10-20 mm, da marca ARGEX e LECA, segundo várias instituições**

As duas argilas expandidas apresentam resistências à compressão face à deformação distintas. Segundo a Figura 4-5, é possível constatar que a argila expandida da marca ARGEX possui resistências à compressão superiores à marca LECA.

Apesar destas diferenças, expõem comportamentos na evolução da resistência à compressão idênticos. O valor da resistência à compressão da argila expandida da ARGEX e da LECA varia com o processo de compactação inicial, aumentando o seu valor ao diminuirmos a espessura da camada.

Assim, com os dados disponíveis na Figura 4-5 é possível adiantar uma resistência à compressão, para uma deformação de 2%, entre 200 e 600 kPa, e para uma deformação de 10%, entre 450 e 1500 kPa, dependendo do material utilizado e do processo de compactação inicial. É importante salientar que para deformações superiores a 10%, a argila expandida apresenta uma grande percentagem de esmagamento, influenciando o seu peso volúmico.

### RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

No Quadro 4-8 encontram-se representados os valores para a resistência ao esmagamento, segundo a norma EN 13055-1, anunciado pelas marcas ARGEX e LECA. Na execução do ensaio é necessário definir o processo de compactação inicial para que não exista um esmagamento prévio.

Nos ensaios realizados o processo de compactação inicial é executado através do funcionamento de placas vibradoras, durante 20 segundos. A força aplicada no pistão terá de

penetrar 40mm no material leve, registrando-se a força que produziu essa deformação, equivalendo a uma deformação superior a 20 % do material leve (Saint-Gobain Weber, 2011b; EN 13055-1, 2002).

**Quadro 4-8 – Resistência ao esmagamento da argila expandida 10-20 mm, anunciada pela ARGEX e a LECA**

	<i>Resistência ao esmagamento [MPa]</i>
<i>ARGEX 10-20 mm</i> (Argex, 2011b)	1,40
<i>LECA 10-20 mm</i> (Saint-Gobain Weber, 2011a)	0,70

A argila expandida 10-20 mm da ARGEX anuncia valores de resistência ao esmagamento muito superiores aos da LECA.

### RESISTÊNCIA AO CORTE

O ângulo de resistência ao corte depende da tensão de confinamento a que estiver sujeito o material, diminuindo perante tensões elevadas.

A ARGEX e a LECA anunciam ângulos de resistência ao corte entre 35° a 40° e entre 35° a 42,5°, respetivamente (Argex, 2011b; Saint-Gobain Weber, 2011a; Arnstein et al, 2002).

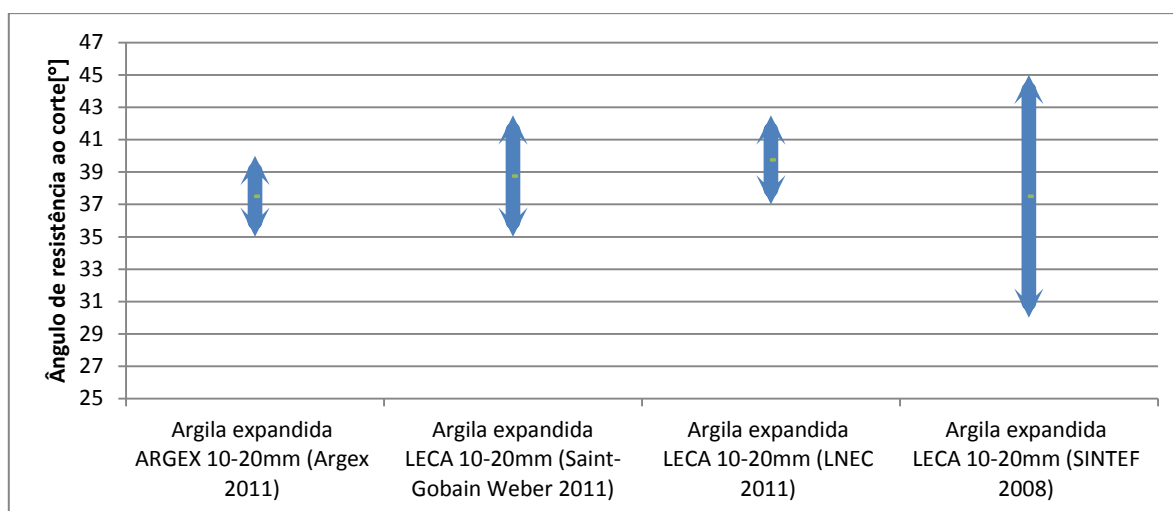
O ensaio de corte triaxial realizado na argila expandida LECA 10-20 mm pelo LNEC determinou os seguintes valores de resistência ao corte (Quadro 4-9) (Caldeira et al, 2011).

**Quadro 4-9 – Ângulo de resistência ao corte para diversas tensões de confinamento da argila expandida LECA 10-20 mm, pelo LNEC**

	<i>Tensões efetivas de confinamento (kPa)</i>	<i>Ângulo de resistência ao corte [°]</i>
<i>Argila expandida LECA 10-20 mm</i> (Caldeira et al, 2011)	50	44,6
	100	38,6
	200	29,3

Nos ensaios triaxiais estáticos realizados no SINTEF, as amostras de argila expandida 10-20 mm da LECA foram ensaiadas com uma taxa de deformação axial de 0,02%/s, até se alcançar a rotura, com uma deformação de 10% do volume inicial. O ensaio alcançou um valor de 42,5° para o ângulo de resistência ao corte de pico, para tensões até 200 kPa. Para tensões superiores o ângulo de resistência ao corte toma valores inferiores, podendo atingir 37° (Saint-Gobain Weber, 2011b).

Na Figura 4-6, resume-se as resistências ao corte da argila expandida 10-20mm referidas anteriormente pelas várias instituições.



**Figura 4-6 – Resistência ao corte da argila expandida 10-20mm face as diferentes tensões de confinamento**

Com base no gráfico da Figura 4-6 é possível referir que em termos médios o material possui um ângulo de resistência ao corte entre 35° e 42°, conforme a tensão aplicada.

#### 4.1.4. DEFORMABILIDADE

O ensaio de compactabilidade realizado pelo SINTEF à amostra de argila expandida 10-20 mm da LECA permitiu determinar o comportamento do volume do material face ao processo de compactação por vibração (Gylland et al, 2010; Saint-Gobain Weber, 2011b; Caldeira et al, 2009; Reis e Ramos, 2009a).

No ensaio de compactabilidade foi utilizada uma placa vibratória como equipamento de compactação, com um funcionamento entre 0 e 180 seg.

É possível constatar a rápida redução do seu volume, necessitando apenas de cerca de 30 seg para alcançar uma redução de 10 % do volume. A argila expandida da LECA para um funcionamento de 60 seg da placa vibratória alcança uma redução do volume de 11,5 % e de 180 seg de 14 %. Para tempos de vibrações superiores a 180 seg a variação da redução do volume é mínima.

A argila expandida da ARGEX também foi submetida a ensaios de compactabilidade realizados pelo LGAI. A energia de compactação foi realizada através do funcionamento de uma placa vibratória, com amplitude e frequência determinada, durante 180 seg, alcançando uma redução média da ordem dos 12 %. É possível salientar que as argilas expandidas da LECA e da ARGEX apresentam a mesma evolução na redução do volume, apesar de a ARGEX precisar ligeiramente de um maior tempo de funcionamento da placa vibratória para alcançar uma compactação da ordem dos 10%.

**MÓDULO DE DEFORMABILIDADE**

Com base no gráfico tensão-deformação (Figura 4-5), determinado para as argilas expandidas da ARGEX e da LECA foi possível estimar o módulo de deformabilidade secante para uma deformação de 2 e 10%, correspondente ao declive do valor de resistência à compressão com a origem (Quadro 4-10).

**Quadro 4-10 – Módulo de deformabilidade secante para uma deformação de 2 e 10% da argila expandida 10-20mm, da marca ARGEX e LECA, segundo várias instituições**

	<i>Redução de volume [%]</i>	<b>Módulo de deformabilidade [MPa]</b>	
		<i>Deformação de 2%</i>	<i>Deformação de 10%</i>
ARGEX 10-20 mm (ARGEX 2011)	10	25	12
ARGEX 10-20 mm (LGA Technological Center 2011)	11,2	25	14
ARGEX 10-20 mm (LGA Technological Center 2011)	12,7	30	15
LECA 10-20mm (Saint-Gobain Weber 2011)	10	10	4,8
LECA 10-20mm (SINTEF 2008)	11,5	10	4,5
LECA 10-20mm (SINTEF 2008)	14	12	5,4

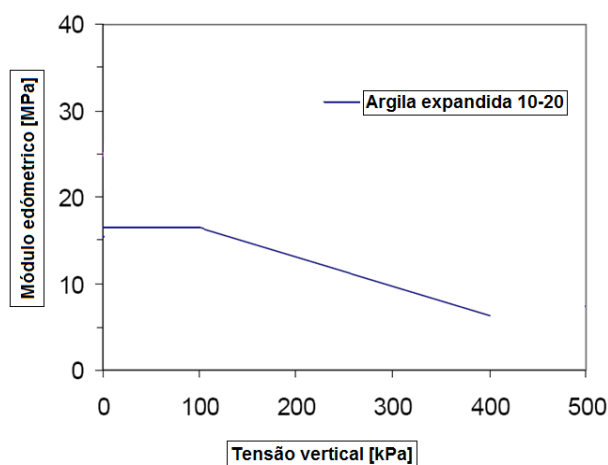
Através do Quadro 4-10, é possível constatar que a argila expandida da ARGEX possui módulos de deformabilidade secantes superiores.

Para uma deformação da ordem dos 2 %, a argila expandida da ARGEX e da LECA possuem um módulo de deformabilidade secante entre 25 e 30 MPa, e entre 10 e 12 MPa, respectivamente.

Para uma deformação da ordem dos 10 %, a argila expandida da ARGEX e da LECA possuem um módulo de deformabilidade secante entre 12 e 15 MPa, e entre 4,8 e 5,4 MPa, respectivamente.

**MÓDULO EDMÉTRICO**

O módulo edométrico, que se designa por  $M$ , é distinto do módulo de deformabilidade anteriormente referido, dado que está associado à deformação do material sob confinamento lateral. A Figura 4-8 apresenta a variação do módulo edométrico da argila expandida 10-20 mm da LECA em função do nível de tensão aplicada verticalmente. O ensaio foi realizado pelo SINTEF para uma compactação inicial que permitiu uma redução da espessura da ordem dos 10%.



**Figura 4-7 – Módulo edométrico da argila expandida 10-20 mm da LECA, pelo SINTEF**

Com base na Figura 4-7, a argila expandida para tensões verticais inferiores a 100 kPa apresenta um valor de módulo edométrico de 17 MPa. Para valores superiores, o módulo edométrico diminui, alcançando valores próximos de 5 MPa para tensões verticais de 400 kPa. É de salientar que o módulo edométrico dependerá da compactação inicial a que estiver sujeito o material.

#### 4.1.5. FLUÊNCIA

Os efeitos diferidos no tempo devido à aplicação de tensões sobre a argila expandida podem ser determinados através da realização de ensaios de fluência (Saint-Gobain Weber, 2011c).

Em 2011, o material de argila expandida de marca LECA foi sujeito a um ensaio para a determinação da sua resistência à fluência pelo SINTEF, com base no Anexo C da prEN 15732, tendo sido obtidos gráficos com a evolução das deformações ao longo do tempo. A argila expandida da marca LECA, quando sujeita a uma tensão de compressão de 235 kPa, evidenciou uma deformação por fluência para uma extrapolação de 50 anos de 1.7 %.

O Quadro 4-10 apresenta o resultado do ensaio de resistência à fluência realizado pelo LGAI na argila expandida 10-20 mm da ARGEX (LGA Technological Center, 2011).

**Quadro 4-11 – Ensaio de resistência à fluência da argila expandida 10-20 mm da ARGEX, pelo LGAI**

	<b>Deformação (carga de 250 kPa) [%]</b>				
	<i>Horas</i>				
	24	48	72	96	120
ARGEX 10-20 mm (LGA, 2011)	0,0125	0,0135	0,0146	0,0235	0,026

Para uma extrapolação polinomial de 50 anos a argila expandida 10-20 mm da ARGEX apresenta uma deformação por fluência de 0,1%, valor inferior ao da LECA.



#### 4.1.6. PERMEABILIDADE

A ARGEX e a LECA anunciam um coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) superior a  $10^{-3}$  m/s (Argex, 2011b; Saint-Gobain Weber, 2011a).

Contudo, num ensaio triaxial realizado no LNEC à argila expandida da LECA, com provetes compactados em laboratório com placa vibradora, foram efetuadas determinações do coeficiente de permeabilidade durante a fase de percolação, tendo conduzido a valores da ordem de  $10^{-6}$  m/s (Caldeira, 2003).

#### 4.1.7. OUTRAS CARATERÍSTICAS

##### RESISTÊNCIA A CICLOS DE GELO-DEGELO

A argila expandida apresenta um valor elevado de isolamento térmico e proteção contra o gelo-degelo. Com o intuito de analisar a reação do material ao processo gelo-degelo, a SINTEF realizou um ensaio segundo a norma EN 12091 (*“Thermal insulating products for building applications: Determination of freeze-thaw resistance”*), que consistia na exposição do material a 300 ciclos de gelo-degelo, e consequentemente análise de resistência a carregamentos através do ensaio edométrico. Após o ensaio, a argila expandida 10-20 mm da LECA não apresentou fendas visíveis ou desintegração do material, não existindo diferenças quanto ao material não exposto ao ciclo de gelo-degelo.

##### REAÇÃO AO FOGO

O material de argila expandida é incluído na classe A1 de reação ao fogo sem necessidade de ensaio, de acordo com a Decisão 96/603/CE, alterada pela Decisão 2000/605/CE (Saint-Gobain Weber, 2011a).

##### CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

No âmbito da dissertação apenas foi analisada a utilização dos materiais leves em termos geotécnicos pelo que o isolamento térmico não será investigado. No entanto, segundo a Saint-Gobain Weber Portugal, o material de argila expandida apresenta o valor de  $0,40 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  para a condutibilidade térmica para camadas abaixo do nível drenado (Maxit Group, 2010).

## 4.2. POLIESTIRENO EXPANDIDO

Alguns dados da informação presente para análise da caracterização do EPS foi recolhida da ACEPE e da EUMEPS. As duas associações representam diversas marcas de produção europeia, sendo os valores apresentados por elas idênticos. Em relação à caracterização realizada a nível mundial escolheu-se a marca BASF e alguns autores que realizaram estudos sobre o EPS.

O poliestireno expandido é classificado de acordo com as normas EN 13163 (*“Thermal insulation products for buildings — Factory made products of expanded polystyrene (EPS)”*) e ASTM D6817 (*“Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam”*).

A norma ASTM D6817 identifica o EPS pelo peso volúmico, servindo de indicador do seu desempenho e das suas propriedades (Insulfoam, 2006). Com a norma EN 13163 o EPS é classificado, identificado e marcado em função das suas propriedades mecânicas (ATLASEPS, 2011).

### 4.2.1. PESO VOLÚMICO

As várias marcas de fabrico disponibilizam o EPS com peso volúmico entre 0,11 e 0,35 kN/m<sup>3</sup> (European Manufacturers of Expanded Polystyrene, 2010; Elragi, 2000; ACEPE, 2011). Esta variação depende, naturalmente, da quantidade de ar contida nos grãos de poliestireno quando da fase de expansão.

O peso volúmico a utilizar para o cálculo de projeto deve ser o valor apresentado à saída da fábrica, na medida que os fatores de majoração utilizados para o processo de compactação na aplicação e de absorção de água em obra são, aproximadamente, nulos. Estes pressupostos advêm do facto do EPS ser um material não higroscópico e de não necessitar de compactação em obra, aspetos justificados neste capítulo.

### 4.2.2. RESISTÊNCIA

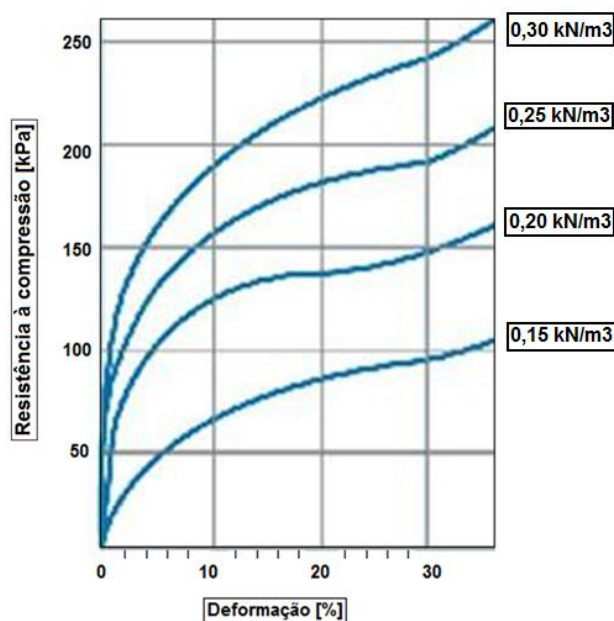
#### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O material de EPS é designado normalmente pela resistência à compressão face a uma deformação de 10%, por exemplo para o EPS 30, o material tem uma resistência à compressão de 30 kPa.

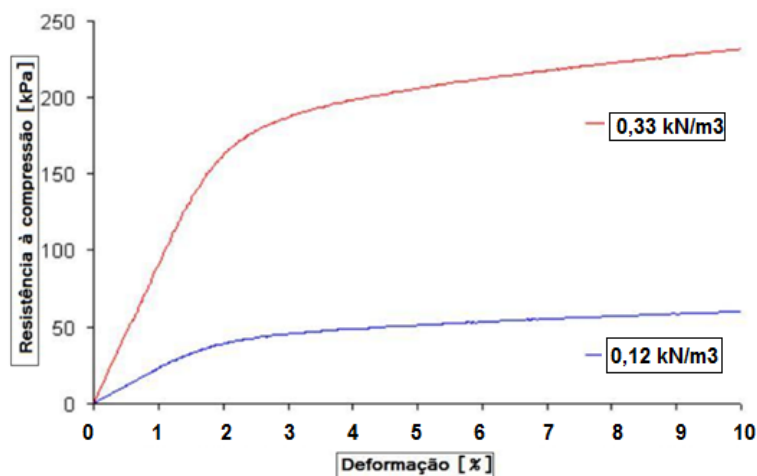
A ACEPE e a BASF realizaram ensaios laboratoriais de caracterização mecânica ao EPS. A ACEPE seguiu a norma EN 826 (*“Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour”*) e a BASF a norma ASTM D1621 (*“Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics”*).

As Figuras 4-8 e 4-9 apresentam os gráficos de resistência à compressão do EPS segundo a ACEPE e a BASF, respetivamente (Elragi, 2000; ACEPE, 2011).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados pela ACEPE em quatro amostras de EPS com pesos volúmcicos diferentes e pela BASF em duas amostras de EPS, um peso volúmcico superior e outro inferior, balizando assim os diversos pesos volúmcicos.



**Figura 4-8 – Resistência à compressão em função da deformação do EPS para diversos pesos volúmcicos, pela ACEPE**



**Figura 4-9 – Resistência à compressão em função da deformação do EPS para dois pesos volúmcicos, pela BASF**

Relativamente à análise dos resultados pode-se afirmar que o valor da resistência à compressão do EPS aumenta de forma, aproximadamente, linear com o peso volúmcico (Figura 4-9).

Os gráficos das Figuras 4-8 e 4-9 apresentam comportamentos idênticos (até uma deformação de 10%), sendo visível um abrandamento no aumento progressivo da resistência à compressão acima dos 2% de deformação. Para deformações inferiores a 2% o EPS expõe um

comportamento elástico. Nesta situação, uma vez retirada a força de compressão, o bloco de EPS recupera a espessura original.

Ao aumentar-se a força de compressão, para deformações superiores a 2%, o EPS supera o limite de elasticidade, resiste menos e deforma mais, verificando-se uma deformação permanente por parte das células. Acima de 30% de deformação, o material tem uma evolução exponencial no comportamento da resistência à compressão (Figura 4-8).

O Quadro 4-12 apresenta um resumo dos valores anunciados pela ACEPE e a BASF para a resistência à compressão de 2% e 10% de deformação, sendo que os valores dos pesos volúnicos indicados abrangem a maior parte da aplicação do EPS no ramo da Geotecnia.

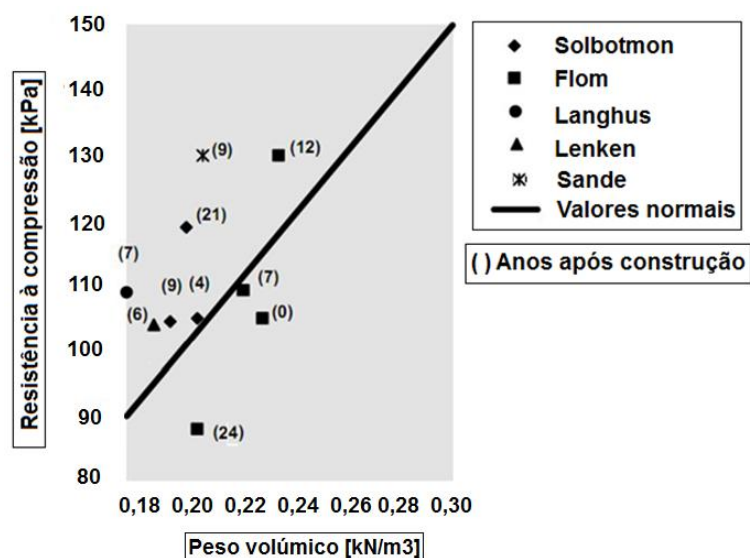
**Quadro 4-12 – Resistência à compressão do EPS para uma deformação de 2 e 10% para os diversos pesos volúnicos, pela ACEPE e a BASF**

<i>Peso volúmico de EPS [kN/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Resistência à compressão [kPa]</i>	
	<i>Deformação 2%</i>	<i>Deformação 10%</i>
0,12	30	60
0,15	30	65
0,20	75	120
0,25	100	160
0,30	130	190
0,33	170	225

Desde a primeira utilização do EPS em obras geotécnicas, vários foram os programas de monitorização levados a cabo para analisar o comportamento do material em obra.

Um dos mais importantes foi realizado na Noruega, em 2001 (Frydenlund e Aaboe, 2001). Este programa envolveu a colheita de amostras em 5 obras geotécnicas, algumas realizadas no início da década de 70. O estudo envolveu ensaios “in-situ” e em laboratório, e visou, fundamentalmente, a avaliação do grau de deterioração do EPS.

O principal indicador de deterioração dos blocos de EPS é a redução da resistência à compressão. Os ensaios de resistência à compressão realizados nas amostras retiradas estão representados na Figura 4-10.



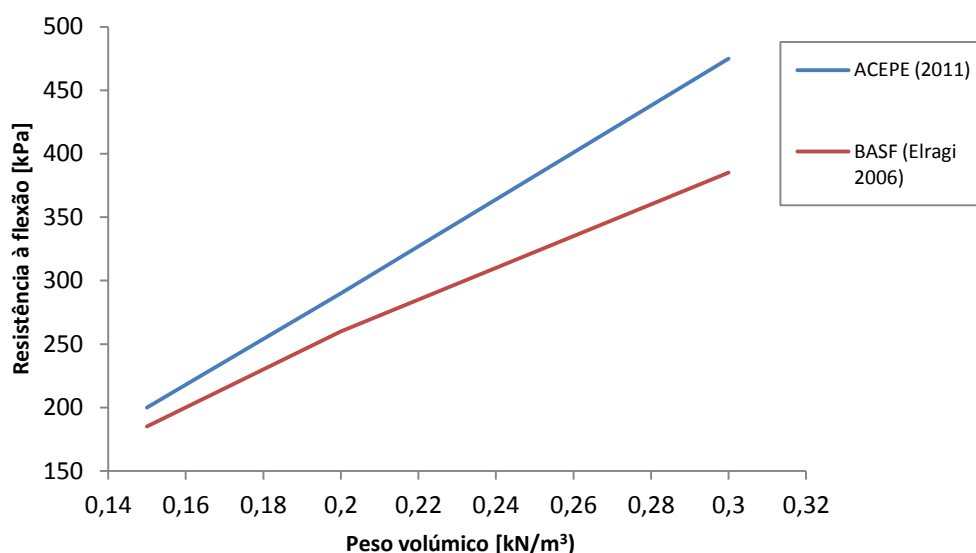
**Figura 4-10 – Resistência à compressão das amostras de EPS retiradas em diversas obras em diferentes datas (Frydenlund e Aaboe, 2001)**

Da Figura 4-10 é possível observar que a maioria das amostras ensaiadas apresentam valores de resistência à compressão superiores aos valores determinados normais para uma deformação de 2% (Quadro 4-12). Os valores elevados de resistência à compressão das amostras foram justificados, pelo Autor, por uma reação química que permitiu o endurecimento do material.

### RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O material de EPS é comercializado em forma de blocos, sendo importante uma quantificação da resistência à flexão. A ACEPE seguiu a norma EN 12089 (*“Thermal insulating products for building applications - Determination of bending behaviour”*), e a BASF a norma ASTM C 578-95 (*“Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation”*), na realização dos ensaios de resistência à flexão (ACEPE, 2011; European Manufacturers of Expanded Polystyrene, 2010; Elragi, 2000).

A Figura 4-11 exibe o limite de resistência à flexão do EPS, segundo diversos pesos volúnicos, dos ensaios realizados pela ACEPE e a BASF.



**Figura 4-11 – Resistência à flexão do EPS para diversos pesos volúmcicos, pela ACEPE e a BASF**

As duas marcas apresentam valores da mesma ordem de grandeza, embora a BASF exponha valores ligeiramente inferiores.

### RESISTÊNCIA AO CORTE

O ângulo de resistência ao corte dos blocos de EPS é definido, não pela resistência ao corte do próprio bloco, mas sim pelo atrito existente entre os blocos.

As zonas de contacto entre os blocos são consideradas os pontos fracos da estrutura de aterro com EPS. A força de atrito presente entre os blocos varia com a existência de água e os elementos de confinamento utilizados, tais como, os geotêxteis, muros de betão, garras metálicas entre outros (Sheeley e Negussey, 2004; Elragi, 2000).

O Quadro 4-13 exhibe as forças de atrito instaladas entre os blocos de EPS, segundo um estudo realizado na Geofoam Research Center. As amostras de EPS utilizadas tinham peso volúmico de  $0,20 \text{ kN/m}^3$ , tendo sido ensaiadas em estado seco e molhado, e com o uso de elementos de confinamento. Os elementos de confinamento utilizados foram a membrana de PEAD lisa, a membrana de PEAD texturada e a membrana de PVC lisa.

**Quadro 4-13 – Coeficiente de atrito entre blocos de EPS, com e sem elementos de confinamento, segundo o ensaio realizado na Geofoam Research Center**

	<i>EPS/EPS (seco)</i>	<i>EPS/EPS (molhado)</i>	<i>EPS/ PEAD texturada</i>	<i>EPS/ PEAD lisa</i>	<i>EPS/ PVC liso</i>
<i>Coeficiente de atrito</i>	0,70	0,65	1	0,23	0,40

Com base no Quadro 4-13, é possível salientar que a existência de água no conjunto de blocos de EPS diminui o coeficiente de atrito, mas sem apresentar grande diferença de valores.

Os blocos de EPS confinados com os elementos de HDPE liso e PVC liso diminuem, substancialmente, o coeficiente de atrito, tomando valores muito inferiores ao coeficiente de atrito entre os blocos simples, não sendo aconselhado utilizar.

Em conclusão, para cálculo, o coeficiente de atrito a considerar é de 0,65 sem elemento de confinamento, e de 1 com membrana de PEAD texturada.

#### 4.2.3. DEFORMABILIDADE

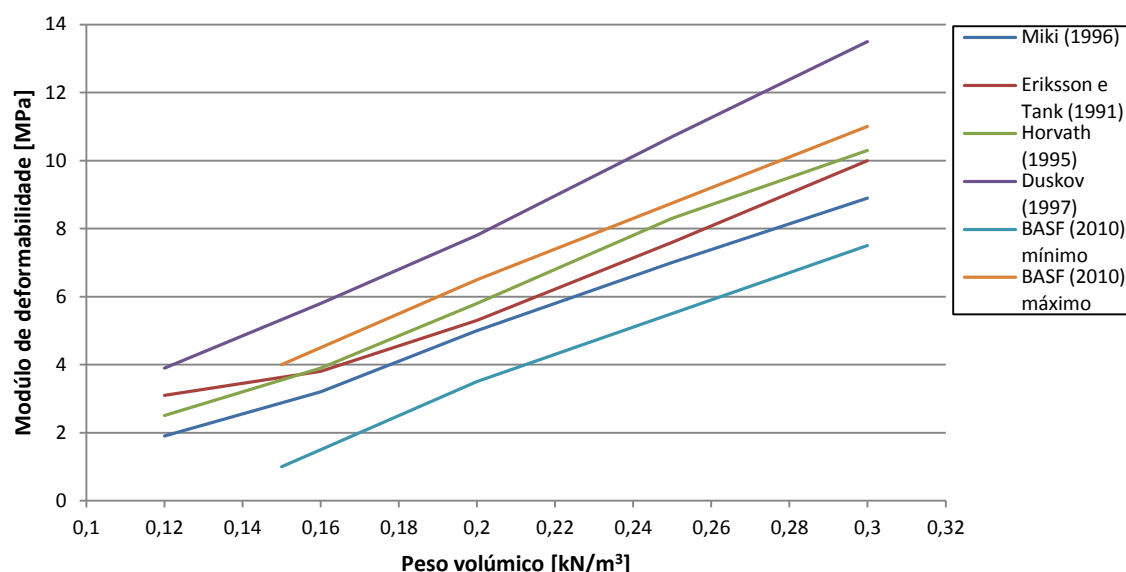
##### MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

Entre 1991 e 1997 diversos autores realizaram ensaios para determinação do módulo de elasticidade do EPS (Figura 4-12).



**Figura 4-12 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade (Negussey, 2011)**

Na Figura 4-13 estão referenciados os valores determinados para o módulo de elasticidade para diversos pesos volúmicos, segundo esses autores e a BASF (Elragi 2000) (BASF 2010).



	<b>Módulo de deformabilidade [MPa]</b>					
	<i>Peso volúmico</i>					
	<i>0,12 kN/m³</i>	<i>0,15 kN/m³</i>	<i>0,16 kN/m³</i>	<i>0,20 kN/m³</i>	<i>0,25 kN/m³</i>	<i>0,30 kN/m³</i>
<i>Miki (1996)</i>	1,9	-	3,2	5	7,0	8,9
<i>Eriksson e Tank (1991)</i>	3,1	-	3,8	5,3	7,6	10
<i>Horvath (1995)</i>	2,5	-	3,9	5,8	8,3	10,3
<i>Duskov (1997)</i>	3,9	-	5,8	7,8	10,7	13,5
<i>BASF (2010) mínimo</i>	-	1	-	3,5	-	7,5
<i>BASF (2010) máximo</i>	-	4	-	6,5	-	11

**Figura 4-13 – Módulo de deformabilidade para diversos pesos volúmcicos do EPS, segundo diversos autores e a BASF**

Os valores determinados, pelos autores referidos, apresentam algumas discrepâncias, não sendo possível avançar valores de módulo de deformabilidade para intervalos mais pequenos. Apesar disso, esses valores encontram-se no intervalo apresentado pela BASF, exceto os valores de Duskov (1997).

Um aspeto a salientar do estudo realizado por Duskov (1997) foi o facto de ter determinado que a variação da temperatura, o nível de absorção de água e a exposição a ciclos de gelo degelo, não influenciam o comportamento mecânico em relação ao módulo de deformabilidade.

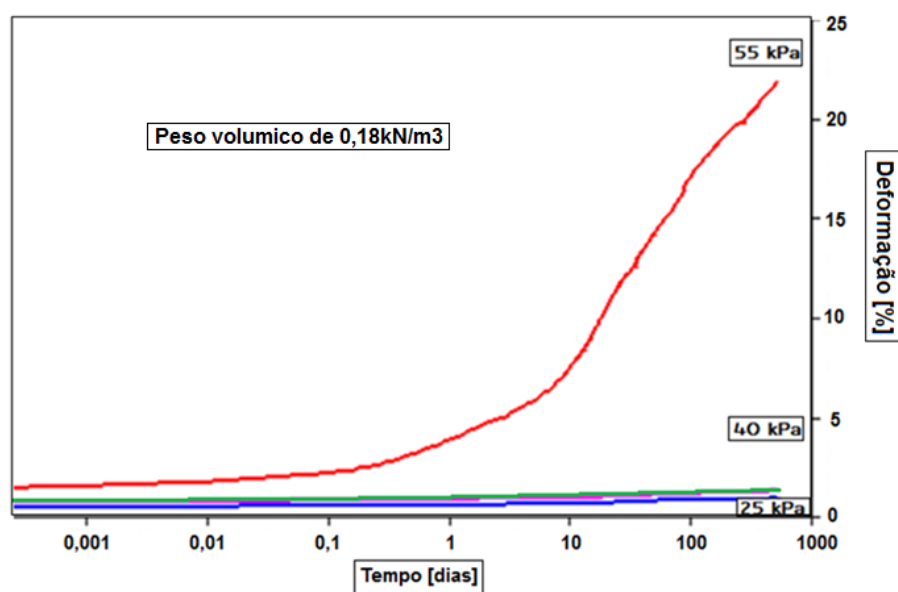
#### 4.2.4. FLUÊNCIA

O EPS é suscetível à deformação quando aplicada uma carga durante um determinado tempo. A densidade é o parâmetro que mais influencia a deformação do EPS face uma carga permanente, diminuindo com o aumento da densidade do EPS.

A Figura 4-14 apresenta os resultados dos ensaios realizados pela BASF em amostras de EPS, com as dimensões de 5x5x5 cm, submetidos a uma carga permanente por um período de 500



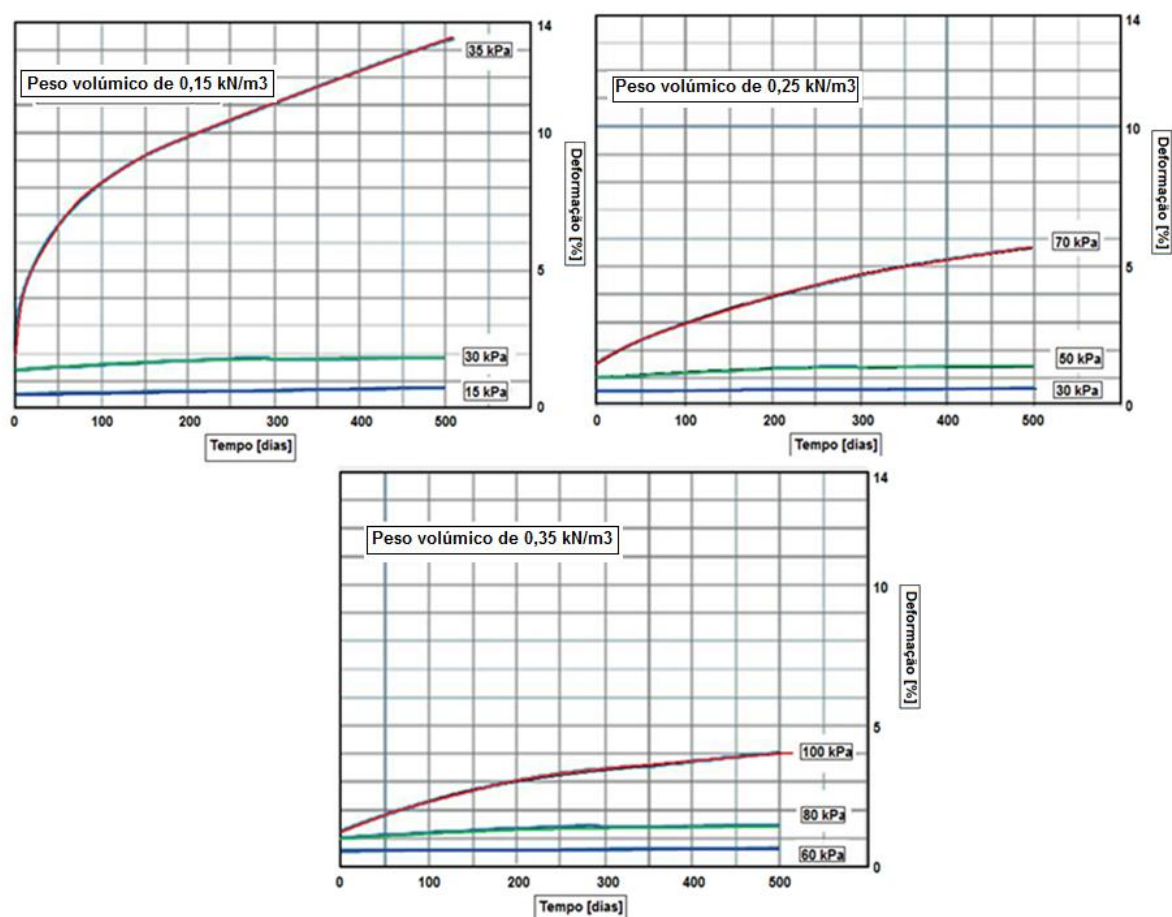
dias. O EPS ensaiado possuía um peso volúmico de  $0,18 \text{ kN/m}^3$ , tendo sido aplicadas cargas de 25, 40 e 55 kPa (Elragi, 2000).



**Figura 4-14 – Deformação dos blocos de EPS face a uma carga permanente, pela BASF**

Na Figura 4-14 é possível observar que para cargas até 40 kPa o EPS não apresenta grandes valores de deformação, alcançando cerca de 3% de deformação da espessura ao fim de 500 dias. Para valores de tensões superiores a 40 kPa a evolução da deformação muda radicalmente, atingindo valores de deformação elevados a curto e longo prazo.

A ACEPE também realizou ensaios de deformação permanente ao EPS para diversos pesos volúnicos, tendo sido aplicadas várias cargas (Figura 4-15) (ACEPE, 2011).



**Figura 4-15 – Deformação dos blocos de EPS face a uma carga permanente, pela ACEPE**

Os ensaios realizados pela ACEPE e a BASF demonstram a mesma evolução da deformação do EPS face a uma carga permanente. É de salientar a importância que o peso volumétrico do EPS provoca nessa evolução, permitindo reduzir a deformação ao aplicar-se EPS com peso volumétrico superior.

Com suporte nos gráficos das Figuras 4-14 e 4-15, estimou-se o valor da deformação da espessura do EPS face a uma carga permanente a longo prazo, dependendo do peso volumétrico (Quadro 4-14).

**Quadro 4-14 – Deformação do EPS face a uma carga permanente a longo prazo, pela ACEPE e pela BASF**

Peso volumétrico [kN/m <sup>3</sup> ]	Deformação [%]										
	Cargas permanentes										
	15kPa	25kPa	30kPa	35kPa	40kPa	50kPa	55kPa	60kPa	70kPa	80kPa	100kPa
0,15	0,90	1,20	2	13,5	-	-	-	-	-	-	-
0,18	-	1	1,25	1,35	1,50	15,20	22	-	-	-	-
0,25	-	-	0,80	0,95	1,10	1,40	2,45	3,50	5,60	-	-
0,35	-	-	-	-	-	-	-	0,80	1,10	1,40	4

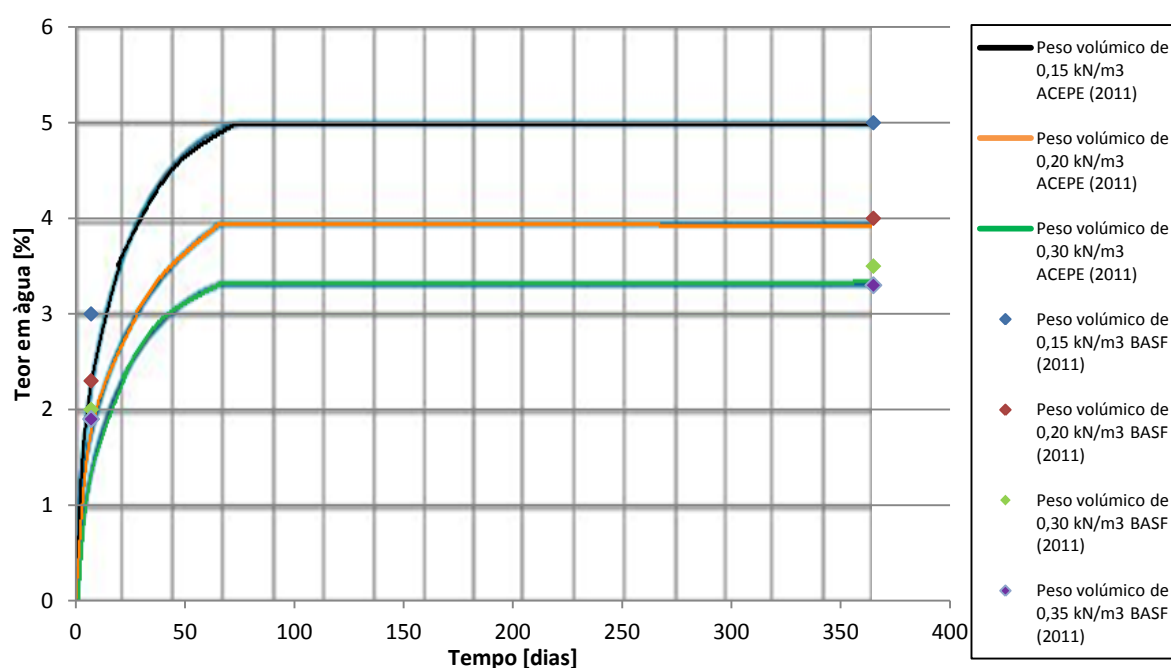
Tendo em conta as Figuras, 4.14 e 4-15, e o comportamento elástico do EPS até uma deformação de 2% da espessura (informação referida anteriormente), a escolha do peso volúmico do EPS a utilizar deve, preferencialmente, apresentar valores de deformação, face a uma carga permanente inferiores a 2%. Através do Quadro 4-14 pode-se determinar facilmente qual o peso volúmico do EPS a utilizar.

#### 4.2.5. TEOR EM ÁGUA

O poliestireno expandido é um material não higroscópico. Quando em contacto com água absorve pequenas quantidades da mesma. Este comportamento ocorre devido à estrutura de células fechadas e ao facto das paredes das células serem impermeáveis à água, ficando retida nos espaços entre os grãos de poliestireno. Desta forma, o material consegue evaporar rapidamente a água retida, sem perder as propriedades.

Os ensaios realizados para calcular a percentagem de absorção de água foram executados segundo a norma DIN 53428 (*"Determination of the behaviour of cellular plastics when exposed to fluids, vapours and solids"*).

A Figura 4-16 apresenta os resultados dos ensaios realizados, pela ACEPE e a BASF, para a determinação dos teores em água do EPS para vários pesos volúmicos, a curto e longo prazo.



**Figura 4-16 – Teor em água para vários pesos volúmicos, segundo a ACEPE e a BASF**

Com apoio na Figura 4-16 constata-se que a percentagem de absorção de água diminui com o aumento do peso volúmico. Este aspeto deve-se à maior resistência de entrada de água entre os grãos de poliestireno.

A maior percentagem de água é absorvida ao fim de, aproximadamente, 60 dias, diminuindo a absorção após essa data.

Os ensaios realizados pela ACEPE e a BASF apresentam o mesmo comportamento do EPS face à absorção de água, sendo que ao fim de 1 ano, com base na Figura 4-16, é possível constatar que ambos apresentam a mesma absorção para os mesmos pesos volúmicos.

Em conclusão, a absorção de água não apresenta grande importância nas características mecânicas do EPS, devido à baixa percentagem de absorção de água e à rápida evaporação. A presença de água pode acarretar problemas no comportamento do EPS, não através da absorção de água mas na presença dela entre os blocos de EPS, podendo possibilitar flutuação dos mesmos.

#### 4.2.6. UTILIZAÇÃO DO EPS EM ASSOCIAÇÃO A OUTROS MATERIAIS

O EPS é compatível com a maioria dos materiais atualmente utilizados na construção civil (ACEPE, 2011; Elragi, 2000). No entanto é sensível a alguns materiais que contenham solventes, como se pode ver no Quadro 4-15. Em contacto com os solventes referenciados a estrutura celular pode ser danificada.

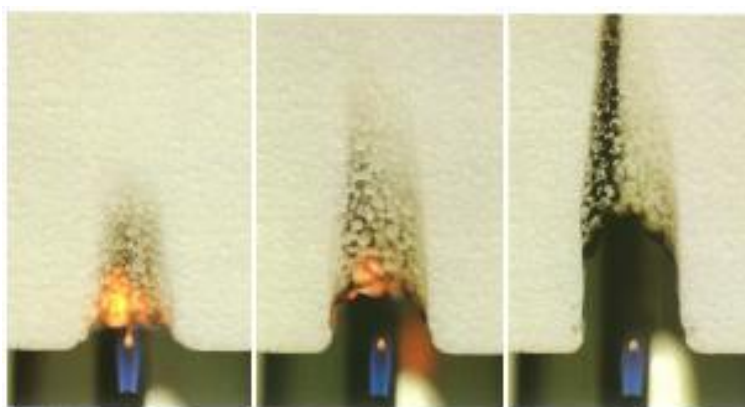
**Quadro 4-15 – Quadro de compatibilidade do EPS, segundo a ACEPE e a BASF**

<b><i>Materiais</i></b>	<b><i>Boa compatibilidade</i></b>	<b><i>Média compatibilidade</i></b>	<b><i>Má compatibilidade</i></b>
<i>Água, água do mar, soluções de sais</i>	X		
<i>Materiais de construção correntes (cal, cimento, gesso)</i>	X		
<i>Soluções alcalinas</i>	X		
<i>Soluções ácidas fracas</i>	X		
<i>Ácido clorídrico 35%</i>	X		
<i>Ácido nítrico 50%</i>	X		
<i>Ácido sulfúrico 95%</i>			X
<i>Sais, adubos</i>	X		
<i>Betumes, produtos betuminosos diluídos com água</i>	X		
<i>Produtos betuminosos com solventes</i>			X
<i>Produtos asfálticos</i>			X
<i>Gasóleo e gasolina</i>			X
<i>Álcool</i>		X	
<i>Solventes orgânicos</i>			X
<i>Hidratos de carbono alifáticos</i>			X

#### 4.2.7. REAÇÃO AO FOGO

O EPS é um material inflamável (ACEPE, 2011; Elragi, 2000). De um modo geral, quando colocado em construção deverá ser revestido por camadas de materiais não combustíveis. Sempre que não for revestido por materiais incombustíveis e resistentes ao fogo, deverá ser do tipo F, ou seja, não inflamável. Segundo a Euroclasse de reação ao fogo, os produtos de construção podem apresentar uma classificação nos ensaios de reação ao fogo entre A e F.

Os EPS não inflamável (Tipo F), ocasionalmente denominado "auto extingüível", contém um inibidor de combustão. Em contacto com uma chama contrai, dificultando a sua ignição. Só após uma exposição prolongada à chama é que pode existir ignição do material, embora a propagação da chama seja sempre muito limitada (Figura 4-17).



**Figura 4-17 – Ensaio de reação ao fogo do EPS (European Manufacturers of Expanded Polystyrene, 2010)**

Os blocos de EPS utilizados no ramo da Geotecnia são classificados do Tipo F. Apesar do EPS ser “auto extingüível” deve-se ter em conta os revestimentos e as colas utilizadas na sua aplicação que possam alterar a reação ao fogo do material.

#### 4.2.8. OUTRAS CARATERÍSTICAS

##### CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Tal como já referido, no âmbito da dissertação apenas foi analisado a utilização dos materiais leves em termos geotécnicos pelo que o isolamento térmico não será investigado. No entanto, segundo a ACEPE e a BASF, considera o valor de condutibilidade térmica para o EPS entre 0,035 W/m C e 0,044 W/m C, dependendo do peso volúmico do material, quanto maior, menor a condutibilidade térmica.

### VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

O EPS não tem limite na exposição a baixas temperaturas, a temperatura mínima de utilização corresponde à da liquefação dos gases contidos nas células (ACEPE, 2011; Elragi, 2000). No entanto, como todos os plásticos, tem um limite superior de exposição à temperatura. Este limite varia em função do tempo de exposição à temperatura e das cargas a que o produto for sujeito. A temperatura máxima que o EPS poderá alcançar é os 100° C em exposições muito curtas, baixando para 80/85° C em situações de exposição prolongada com a aplicação de cargas elevadas. Quando submetido a temperaturas elevadas a estrutura celular do EPS começa a fundir, permitindo a saída do ar, causando a perda de espessura e das propriedades isolantes.

### PERMEABILIDADE

Quanto à permeabilidade, o EPS apresenta valores muito próximos de 0, devido à porosidade fechada, sendo esse coeficiente afetado pelo conjunto das juntas de encaixe e de modulação.

### DURABILIDADE

A durabilidade das características do EPS depende da correta aplicação, para que seja garantido um desempenho adequado ao longo do tempo.

A radiação solar direta, bem como outros tipos de radiações ricas em energia, deterioram o EPS por alterarem a estrutura química. Este processo é lento e dependente da intensidade de radiação e do tempo de exposição. Em conjunto, as radiações e as intempéries aceleram o processo de deterioração.

### 4.3. ESPUMA DE VIDRO

Relativamente à espuma de vidro, sendo um material desconhecido, a informação laboratorial atual é escassa, existindo apenas a informação prestada pelas marcas. Assim, a caracterização mecânica da espuma de vidro apresentada focou-se em valores referenciados pela marca MISAPOR, HASOPOR e num relatório técnico europeu realizado pelo SINTEF e pelo NBI. Os poucos estudos realizados sobre a espuma de vidro visam monitorizar e analisar obras já executadas com este material.

As características mecânicas da espuma de vidro dependem da densidade, da granulometria, do processo de compactação e da percentagem de vidro face à percentagem de ar contida em cada partícula no fabrico (Clean Washington Center, 2002).

#### 4.3.1. GRANULOMETRIA

A espuma de vidro é comercializada, para uso no ramo da Geotecnia, segundo a granulometria (como a argila expandida) e o peso volúmico.

A marca MISAPOR disponibiliza a espuma de vidro 10-50 mm (partículas com dimensões entre 10 e 50 mm) e a espuma de vidro 10-75 mm (partículas com dimensão entre 10 e 75 mm) (Misapor, 2011c).

A marca HASOPOR produz a espumas de vidro Light ( $1,80 \text{ kN/m}^3$ ) e Standard ( $2,30 \text{ kN/m}^3$ ), segundo o peso volúmico (Hasopor, 2011).

As Figuras 4-18 e 4-19 representam as análises granulométricas das espumas de vidro HASOPOR Light e Standard, com e sem processo de compactação, segundo a norma EN 933-1 (EN 933-1, 2000; Norwegian Building Research Institute, 2005). O processo de compactação realizado é desconhecido, sabendo apenas que provoca um fator de compactação de 1,25. Os países nórdicos caracterizam o grau de compactação do material através do termo “fator de compactação”, que resulta no aumento do peso volúmico do material após o processo de compactação, face ao peso do material solto.

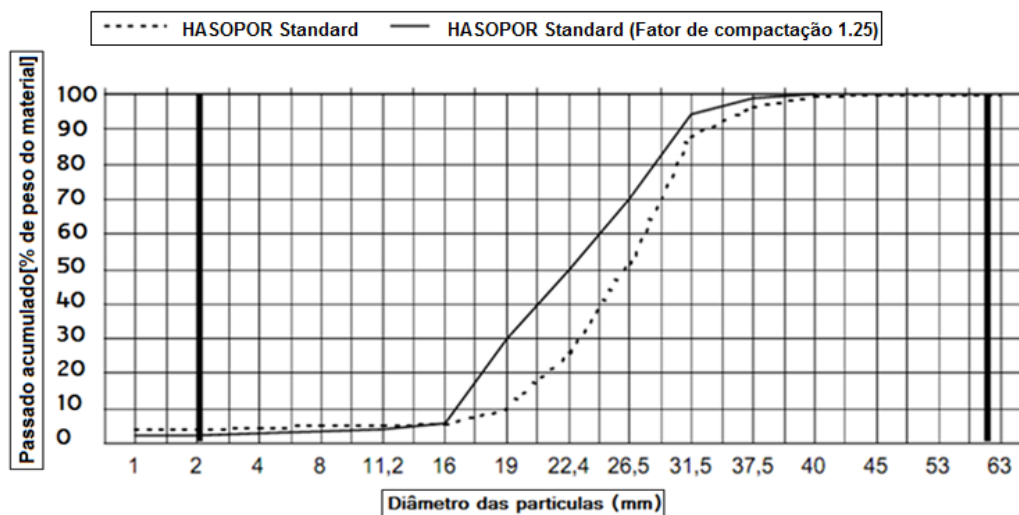


Figura 4-18 – Curva granulométrica da espuma de vidro HASOPOR Standard, com e sem processo de compactação

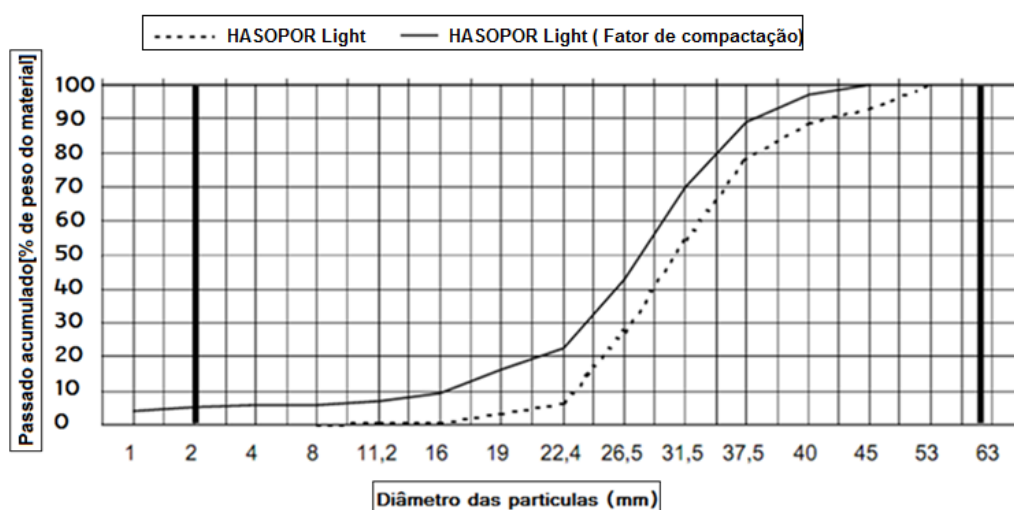


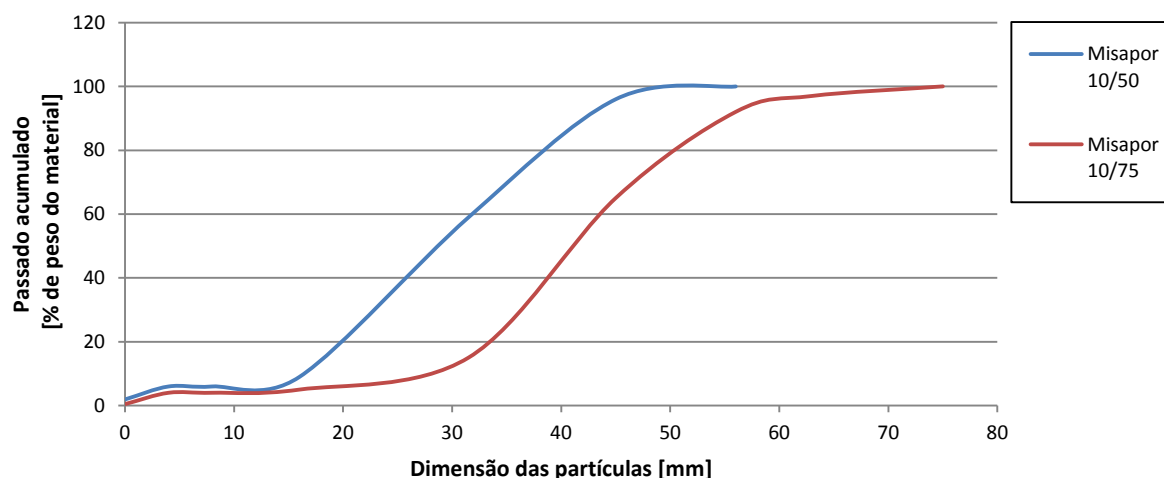
Figura 4-19 – Curva granulométrica da espuma de vidro HASOPOR Light, com e sem processo de compactação

Através da análise das curvas granulométricas das Figuras 4-18 e 4-19 pode observar-se que o processo de compactação realizado na espuma de vidro reduz globalmente a granulometria do material, aumentando a percentagem de finos. Ao comparar-se os dois materiais da HASOPOR, é de salientar que a espuma de vidro Light apresenta maior percentagem de partículas de dimensões elevadas e após compactação possui menor percentagem de finos, sendo estes factores responsáveis pelo seu menor peso volúmico em comparação à espuma de vidro Standard.

A MISAPOR, segundo a mesma norma, apresenta na Figura 4-20 as análises granulométricas da espuma de vidro 10-50 mm e 10-75 mm, após processo de compactação,



provocando um aumento do peso volúmico do material na ordem dos 30% (Fator de compactação de 1,3).



**Figura 4-20 – Curvas granulométricas da espuma de vidro MISAPOR 10/50 e 10/75, após processo de compactação**

A espuma de vidro 10/75 exibe uma granulometria superior face ao material 10/50. Enquanto a espuma de vidro 10/50 possui na maioria partículas com dimensões inferiores a 50 mm, a espuma de vidro 10/75 possui partículas com dimensões inferiores a 75 mm.

Através das Figuras 4-18, 4-19 e 4-20 podem retirar-se os diâmetros correspondentes às percentagens de 10%, 60% e 90% de partículas passadas (Quadro 4-16).

**Quadro 4-16 – Diâmetros correspondentes às percentagens de partículas passadas nos diversos peneiros da espuma de vidro da HASOPOR e MISAPOR**

		<b><i>Diâmetro das partículas [mm]</i></b>		
		<i>Percentagem de partículas passadas</i>		
		<i>10%</i>	<i>60%</i>	<i>90%</i>
<i>HASOPOR Standard</i>	<i>Material à saída da fábrica</i>	<16,5	<20,35	<30
	<i>Fator de compactação 1,25</i>	<19	<28,5	<33
<i>HASOPOR Light</i>	<i>Material à saída da fábrica</i>	<16	<28,5	<37,5
	<i>Fator de compactação 1,25</i>	<21	<33,5	<42,5
<i>MISAPOR 10-50mm</i>	<i>Fator de compactação 1,30</i>	<16,5	<31,5	<42
<i>MISAPOR 10-75mm</i>	<i>Fator de compactação 1,30</i>	<24	<44	<55

Como é possível constatar pelo Quadro 4-16 a granulometria da HASOPOR Standard e da MISAPOR 10-50 mm apresentam valores idênticos, o mesmo se passa com a granulometria da HASOPOR Light e da MISAPOR 10-75 mm.

As granulometrias, da HASOPOR Standard e da MISAPOR 10-50 mm, possuem cerca de 90% de partículas com dimensões entre 16,5 e 42 mm. Enquanto a HASOPOR Light e a MISAPOR 10-75 mm entre 21 e 55 mm.

#### 4.3.2. PESO VOLÚMICO

##### PESO VOLÚMICO À SAÍDA DE FÁBRICA

A espuma de vidro disponibilizada pela MISAPOR apresenta duas granulometrias, a 10/50 com peso volúmico entre 1,6 kN/m<sup>3</sup> e 1,9 kN/m<sup>3</sup>, e a 10/75 com peso volúmico entre 1,25 kN/m<sup>3</sup> e 1,5 kN/m<sup>3</sup> (Misapor, 2011a; Misapor, 2011b).

A HASOPOR, também fabricante de espuma de vidro, produziu, até à data, dois materiais com peso volúmico de 2,30 kN/m<sup>3</sup> e outro com 1,80 kN/m<sup>3</sup>, com uma tolerância de  $\pm 15\%$  (Aaboe e Oiseth, 2009; Norwegian Building Research Institute, 2005).

##### PESO VOLÚMICO APÓS COMPACTAÇÃO

A HASOPOR e a MISAPOR, após aplicação da espuma de vidro, aconselham que exista um processo de compactação que permita uma redução da espessura da camada entre 25% a 30%.

Em 2005, a NBI (Norwegian Building Institute) emitiu uma aprovação técnica europeia da espuma de vidro produzida pela marca HASOPOR. A Figura 4-21 apresenta o gráfico que relaciona o peso volúmico com a redução do volume do material, segundo a norma EN 13055-1.

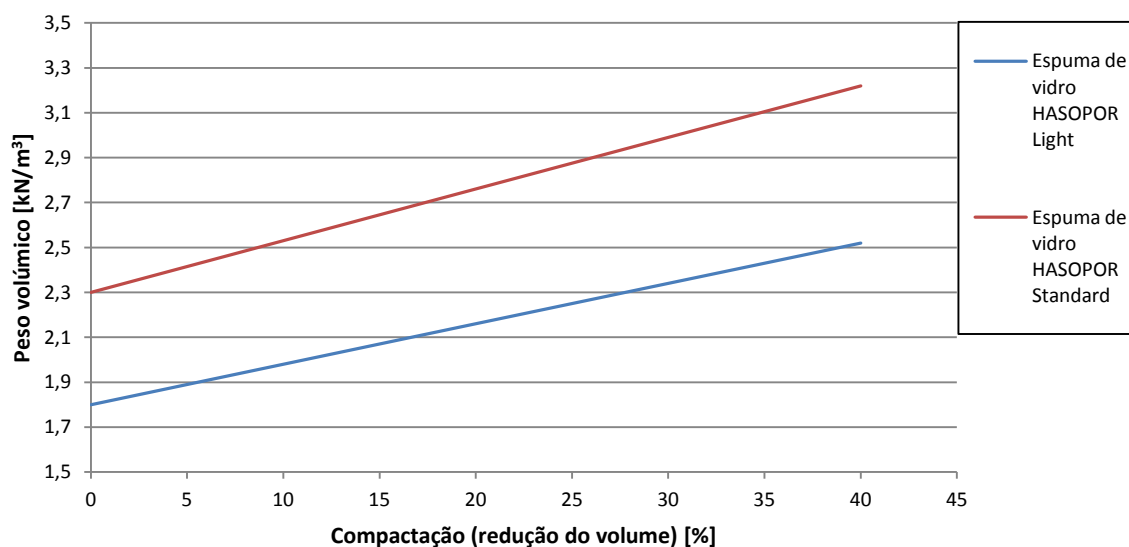


Figura 4-21 – Peso volúmico da espuma de vidro face ao processo de compactação, pelo NBI

Apesar dos dois tipos de espuma vidro possuírem pesos volúmicos diferentes apresentam uma evolução do peso volúmico face a compactação muito idêntica, sendo possível avançar um aumento do peso volúmico médio de 31% para uma redução do volume de 30% (entre os dois tipos de espuma de vidro).

Em conclusão, é possível confirmar o aumento do peso volúmico da espuma de vidro após processo de compactação, aumentando a sua densidade relativa por diminuição do índice de vazios, pelo que advirá um aumento do peso volúmico, em geral de 30%.

### PESO VOLÚMICO SUBMERSO

O NBI realizou ensaios de determinação de absorção de água na espuma de vidro da HASOPOR, segundo a norma EN 12087 (*“ Thermal insulating products for building applications. Determination of long term water absorption by immersion”*). O ensaio foi realizado através da imersão de amostras de HASOPOR Light e Standard durante 28 dias e 68 semanas (Quadro 4-17).

**Quadro 4-17 – Absorção de água da espuma de vidro HASOPOR**

	<i>Teor em água [%]</i>	
	<i>Ao fim de 28 dias</i>	<i>Ao fim de 68 semanas</i>
<i>HASOPOR Light</i>	31	40
<i>HASOPOR Standard</i>	30	50

A diferença de pesos volúmicos entre os dois materiais não afetou a quantidade de água absorvida a curto prazo, resultando valores próximos para ambos, concluindo-se que o peso volúmico da espuma de vidro não influencia a absorção de água a curto prazo.

A longo prazo o mesmo não se passa, sendo que a espuma de vidro com o peso volúmico mais elevado absorve maior quantidade de água.

Com base no referido, em situações nas quais a presença de água é transitória, o aumento de peso volúmico a considerar para pré-dimensionamento será de 30%. Já em situações em que a presença de água pode ter um carácter de quase permanência, é de considerar a completa saturação do material, pelo que o aumento será da ordem dos 50% (majorações iguais às realizadas na argila expandida).

### VALOR DE PROJETO

Em 2000, a NPRA e o SINTEF iniciaram um programa de controlo das características a longo prazo da espuma de vidro produzida pela marca HASOPOR (Aaobe et al, 2005; Aaboe e Oiseth, 2009).

O programa consistia na medição do teor em água e da densidade do material em obras nas quais utilizaram o material HASOPOR Standart e Light. As espumas de vidro utilizadas possuíam um peso volúmico médio teórico (peso volúmico afetado com a majoração do processo de compactação

e absorção de água), respetivamente de  $3,50 \text{ kN/m}^3$  e  $3 \text{ kN/m}^3$ . No Quadro 4-18 apresentam-se os resultados do teor em água e do peso volúmico.

**Quadro 4-18 – Teor de água e peso volúmico medidos em aterros realizados com espuma de vidro HASOPOR Light e Standard (Aaboe e Oiseth, 2009)**

<i>Local de obra</i>	<i>Espuma de vidro</i>	<i>Ano de medição</i>	<i>Teor de água [%]</i>	<i>Peso volúmico [<math>\text{kN/m}^3</math>]</i>	<i>Percentagem de finos<sup>3</sup> [%]</i>
<i>Lodalén, 2001</i>	HASOPOR Light	2001	18	3,25	-
<i>RV 120, 2001</i>	HASOPOR Light	2001	-	5,00	65
<i>E6 Mule, 2002</i>	HASOPOR Light	2002	-	2,95	35
<i>E6 Eggemarka, 2003</i>	HASOPOR Standard	2003	15	3,45	20
<i>E6 Rosendal, 1999</i>	HASOPOR Standard	2002	18	5,30	30
<i>E6 Klemetsrud, 2003</i>	HASOPOR Light	2003	0,5	2,71	20

Através do Quadro 4-18 é possível comparar o peso volúmico teórico admitido com o valor real em obra.

O valor teórico admitido para as obras de Lodalen, Mule, Eggemarka e Klemetsrud não apresentam grande variação, tendo sido corretos os pressupostos tomados quanto ao fator de compactação e absorção de água, referidos anteriormente.

Na obra de RV 120 e de Rosendal, o mesmo não pode ser referido. O elevado peso volúmico medido na Rv 120 pode ser justificado pela enorme percentagem de finos, presumindo tensões excessivas aplicadas no aterro de espuma de vidro.

O elevado peso volúmico da obra de Rosendal não é justificável através da informação prestada pelo Quadro 4-18, sendo visível que os valores de teor em água e percentagem de finos estão dentro dos admitidos.

Em conclusão, a espuma de vidro quando aplicada é afetada pelos fatores de majoração de 1,30, devido ao aumento do peso volúmico por compactação e de 1,30 ou 1,50 devido à absorção de água, podendo considerar-se um peso volúmico entre 3 e  $4 \text{ kN/m}^3$ . Como já foi referido os valores obtidos, poderão ser tratados como valores característicos.

### 4.3.3. RESISTÊNCIA

#### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

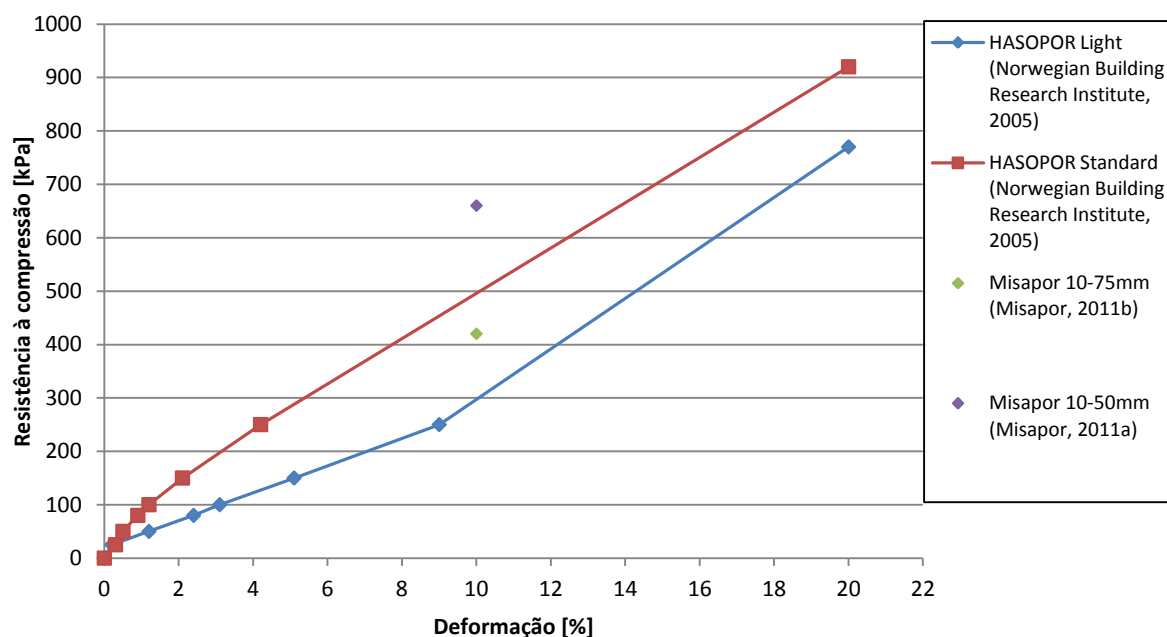
As espumas de vidro produzidas pela HASOPOR foram submetidas a ensaios edométricos permitindo determinar a resistência à compressão do material. O ensaio seguiu o procedimento

<sup>3</sup> Dimensão das partículas inferiores a 8mm

descrito no anexo B da CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure), tendo existido um processo de compactação inicial que aumentou o peso volúmico do material em cerca de 25% face ao material à saída da fábrica (Aaboe e Oiseth, 2009; Norwegian Building Research Institute, 2005).

A MISAPOR avança com resistências à compressão, para uma deformação de 10%, da ordem dos 420 kPa para a espuma de vidro 10-75 mm e dos 660 kPa para a de 10-50 mm (Misapor, 2011a; Misapor, 2011b).

A Figura 4-22 apresenta as resistências à compressão da espuma de vidro HASOPOR Light, HASOPOR Standard, MISAPOR 10-50 mm e MISAPOR 10-75 mm.



	HL		HS		HL		HS		HL		HS		HL		HS		M75	M50	HL	HS
Resistência à compressão [kPa]	25	25	50	50	80	80	100	100	150	150	250	250	420	660	770	920				
Deformação [%]	0,2	0,3	0,5	1,2	0,9	2,4	1,2	3,1	2,1	5,1	9	4,2	10	10	20	20				

HL – HASOPOR Light; HS – HASOPOR Standard; M50 – MISAPOR 10-50 mm; M75 – MISAPOR 10-75 mm.

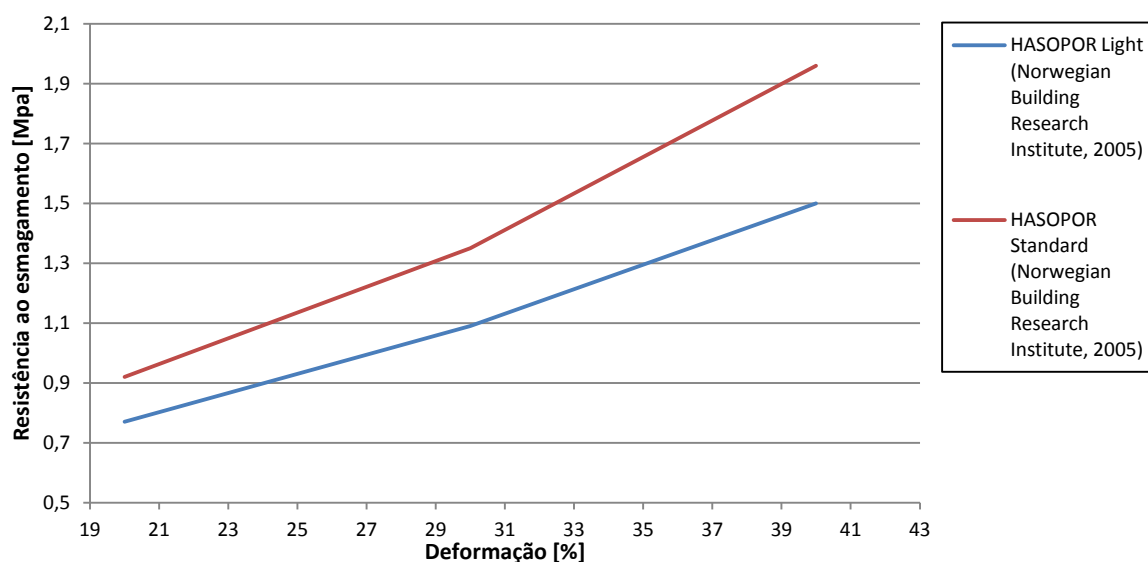
**Figura 4-22 – Resistência à compressão da espuma de vidro da HASOPOR e da MISAPOR**

O gráfico da Figura 4-22 tem como objetivo mostrar a evolução da deformação da espuma de vidro após aplicada em obra (o que advirá um aumento do peso volúmico na ordem dos 30%), face a aplicação de uma carga. Como é possível constatar, os dois materiais da HASOPOR, apesar de possuírem resistências à compressão diferentes, expõem evoluções parecidas, sendo este aspeto mais representativo para deformações superiores a 9%.

Quanto às espumas de vidro da MISAPOR, não é possível demonstrar a evolução da resistência à compressão, na medida que só existe informação sobre a resistência à compressão para deformações de 10%. Para deformações da ordem dos 10% os materiais da MISAPOR apresentam valores de resistência à compressão superiores aos da HASOPOR.

### RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

Do ensaio edométrico realizado aos materiais da HASOPOR foi também possível determinar os valores de resistência ao esmagamento, tendo-se aumentado a carga aplicada, permitindo deformações superiores a 20%. A Figura 4-23 apresenta o comportamento do material face ao aumento de carga.



	HL	HS	HL	HS	HL	HS
<b>Resistência ao esmagamento [MPa]</b>	0,77	0,92	1,09	1,35	1,5	1,96
<b>Deformação [%]</b>	20	20	30	30	40	40

HL- HASOPOR Light; HS- HASOPOR Standard;

**Figura 4-23 – Resistência ao esmagamento da espuma de vidro da HASOPOR**

### RESISTÊNCIA AO CORTE

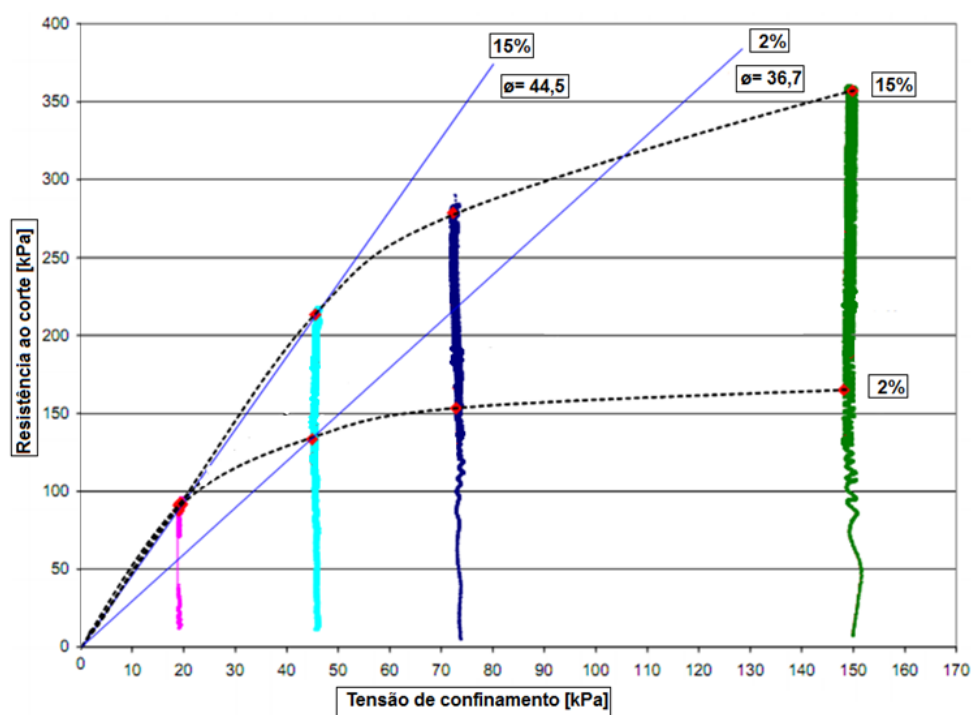
O agregado de espuma de vidro da HASOPOR Standard foi submetido a ensaios de carregamento triaxial cíclico e estático pelo SINTEF (Norwegian Public Roads Administration, 2007).

O ensaio triaxial estático foi realizado em amostras com 300 mm de diâmetro, com um fator de compactação de 1,02 e 1,15, tendo sido aplicadas cargas axiais de 20, 45, 75 e 150 kPa (Figura 4-24).



Figura 4-24 – Ensaio triaxial estático à espuma de vidro da HASOPOR Standard

Os resultados são interpretados de acordo com o critério de rotura de Mohr-Coulomb que permite conhecer o seu ângulo de atrito interno (Figura 4-25) (Aaobe et al, 2005).



	<b>Ângulo de atrito interno [°]</b>			
	<i>Tensão de confinamento</i>			
	20 kPa	45 kPa	75 kPa	150 kPa
<i>Fator de compactação de 1,02</i>	44,5	36,7	26,1	-
<i>Fator de compactação de 1,15</i>	44,5	44,5	41,5	30

Figura 4-25 – Ângulo de resistência ao corte para diferentes tensões de confinamento da espuma de vidro HASOPOR Standard (Aaobe et al, 2005)

Pela Figura 4-25 é possível identificar um ângulo de resistência ao corte da ordem dos 45° para tensões de confinamento até 45 kPa, desde que a espuma de vidro aplicada possua um fator de compactação superior a 1,15.

#### 4.3.4. DEFORMABILIDADE

##### MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

Com base no gráfico tensão-deformação (Figura 4-23), determinado para as espumas de vidro da HASOPOR e MISAPOR foi possível estimar o módulo de deformabilidade secante para uma deformação de 2 e 10%, correspondente ao declive do valor de resistência à compressão com a origem (Quadro 4-19).

**Quadro 4-19 – Módulo de deformabilidade secante para uma deformação de 2 e 10% da espuma de vidro da marca ARGEX e LECA, segundo várias instituições**

	Fator de compactação	Módulo de deformabilidade [MPa]	
		Deformação de 2%	Deformação de 10%
HASOPOR Light (Norwegian Building Research Institute, 2005)	1,25	3,5	3
HASOPOR Standard (Norwegian Building Research Institute, 2005)	1,25	7,25	4,6
MISAPOR 10-75 mm (Misapor, 2011b)	1,30	-	4,2
MISAPOR 10-75 mm (Misapor, 2011a)	1,30	-	6,6

Através do Quadro 4-19, é possível constatar que a espuma de vidro da MISAPOR para uma deformação da ordem dos 10% possui módulos de deformabilidade secantes superiores.

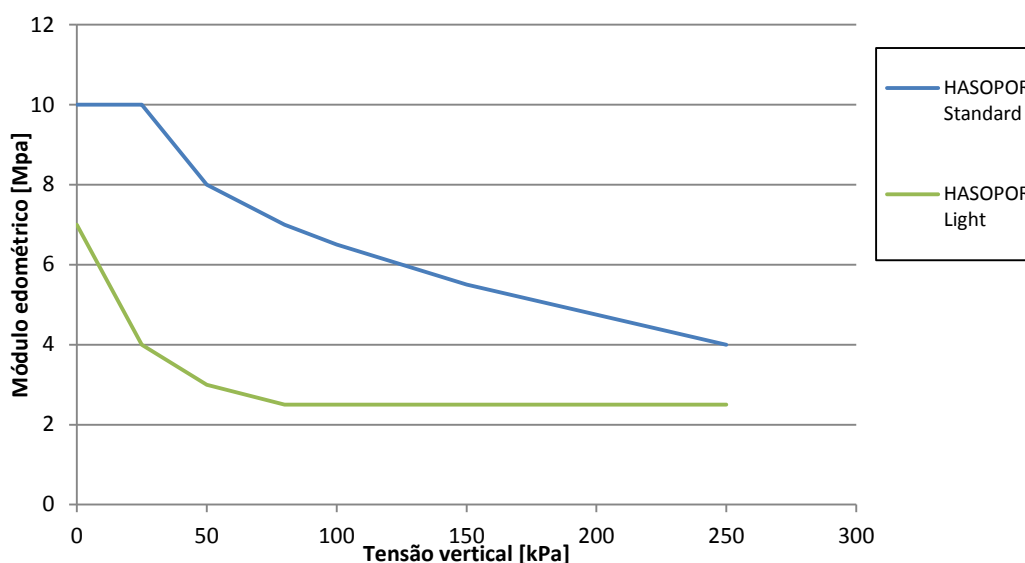
Para uma deformação da ordem dos 2 %, a espuma de vidro da HASOPOR possui um módulo de deformabilidade secante entre 3,5 e 7,25 MPa.

Para uma deformação da ordem dos 10 %, a espuma de vidro da HASOPOR e da MISAPOR possuem um módulo de deformabilidade secante entre 3 e 4,6 MPa, e entre 4,2 e 6,6 MPa, respectivamente.

##### MÓDULO EDMÉTRICO

A Figura 4-26 mostra a variação do módulo edométrico (ensaio já referido) da espuma de vidro HASOPOR Light e Standard em função do nível de tensão aplicada verticalmente (Norwegian Building Research Institute, 2005; Norwegian Public Roads Administration, 2007).





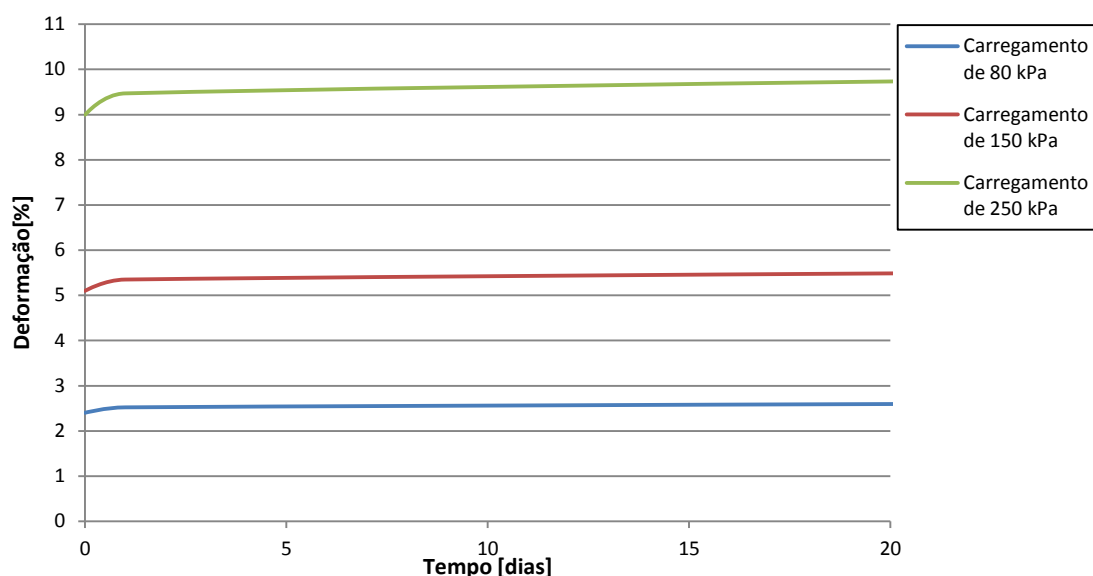
**Figura 4-26 – Módulo edométrico para diferentes tensões verticais da espuma de vidro HASOPOR, pelo NBI**

Com base na Figura 4-26 são visíveis os diferentes valores do módulo edométrico das duas espumas de vidro da HASOPOR. A HASOPOR Standard possui valores superiores, diminuindo essa diferença com o aumento da tensão vertical, apresentando um valor de 4 MPa para cargas até 250 kPa. A HASOPOR Light comporta-se da mesma maneira adquirindo e estabilizando um valor de 2,5 MPa para cargas superiores até 250 kPa.

#### 4.3.5. FLUÊNCIA

O ensaio edométrico realizado prolongou-se com o intuito de incluir ensaios que permitem obter valores característicos de deformação a longo prazo.

O ensaio realizado para a determinação das deformações a longo prazo seguiu o procedimento descrito no anexo C da CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure) e abrangeu só a HASOPOR Light. Para tal, foram realizados carregamentos permanentes de 80, 150 e 250 kPa sobre o material e registadas as deformações ocorridas (Figura 4-27).



Carga instalada [kPa]	Deformação [%]		
	Instantânea	1 Ano	50 Anos
80	2,4	2,52	2,69
150	5,1	5,35	5,66
250	9,0	9,47	10,07

**Figura 4-27 – Deformação da HASOPOR Light face a carregamentos permanentes**

Após análise da Figura 4-27, verifica-se que a espuma de vidro da HASOPOR Light apresenta valores de deformação pouco superiores a 10% quando sujeita a cargas permanentes de 250 kPa.

O programa de controlo de características a longo prazo realizado pelo NPRA e pelo SINTEF incluiu também a medição de deformações a curto e longo prazo das obras seleccionadas. No Quadro 4-20 estão presentes os resultados.

**Quadro 4-20 – Deformação a curto e longo prazo de aterros realizados com espuma de vidro (Aaboe e Oiseth, 2009)**

Local de obra	Espuma de vidro	Fator de compactação [%]	Deformação [%]	
			Curto prazo	Longo prazo
Lodalen, 2001	HASOPOR Light	1.25	1.5-2	2-3
RV 120, 2001	HASOPOR Light	1.60	1	1-1.5
E6 Eggemarka, 2003	HASOPOR Standard	-	1	1.5
E6 Klemetsrud, 2003	HASOPOR Light	1.20	0,5	1

Após consolidação do material, as obras apresentam pequenas variações de deformações perante cargas, cerca de 0,5 a 2 % da espessura total a curto prazo. Após três anos, o aumento da deformação é mínimo, não ultrapassando 3 % da espessura total.

Na obra RV 120 o elevado fator de compactação inferiorizou as deformações a curto e longo prazo.

Os valores obtidos em laboratório (Figura 4-27) estão acima dos alcançados nestas obras, sendo correto a utilização desses valores.

#### 4.3.6. PERMEABILIDADE

A permeabilidade da espuma de vidro depende principalmente do grau de compactação. O material apresenta valores de permeabilidade entre 0.05 a 0.25 cm/seg, valores comparados com os de areia e cascalho (Clean Washington Center, 2002).

#### 4.3.7. OUTRAS CARATERÍSTICAS

Em termos de durabilidade, não existe uma validade concreta. A durabilidade das características da espuma de vidro depende da correta aplicação, para que seja garantido um desempenho adequado ao longo do tempo.

A espuma de vidro não contém quaisquer substâncias ou gases nocivos e é absolutamente neutra. É classificada como classe A1 de reação ao fogo, de acordo com a norma EN 13501-1 (*"Fire classification of construction products and building elements-part 1"*), que consiste na classificação de desempenho face ao fogo de produtos e elementos de construção (Norwegian Building Research Institute, 2005).



## 5. APLICAÇÃO DE MATERIAIS LEVES EM ATERROS

Nos países onde os materiais leves são aplicados com mais frequência não existem grandes condições/restrições para a sua colocação em obra.

No capítulo 5 procura-se compilar as soluções construtivas mais frequentes dos materiais leves estudados, as quais têm estado associadas boas práticas construtivas.

Ao contrário dos solos tradicionais, a colocação destes materiais em aterro não é tão exigente em termos de qualidade da técnica construtiva, obtendo-se em regra bons resultados.

Os equipamentos associados à colocação em obra destes materiais podem ser os utilizados correntemente, podendo, no entanto, tirar partido de equipamentos específicos para reduzir custos, encurtar prazos de execução ou simplesmente facilitar a construção de aterros.

### 5.1. ARGILA EXPANDIDA

#### 5.1.1. TRANSPORTE

O transporte da argila expandida até ao local de execução do aterro é, em regra, realizado através de camiões de transporte rodoviário. Em geral, os camiões utilizados são semi-reboques graneleiros de 25 ton com capacidade de transporte até 65 m<sup>3</sup>, conseguindo-se uma elevada eficiência em transporte, em comparação a um material convencional de aterro (Figura 5-1).



**Figura 5-1 – Camião semi-reboque de 25 ton para o transporte de argila expandida (Saint-Gobain Weber, 2009)**

Os caminhões de transporte de argila expandida podem ser carregados a granel ou em “bigbags” com aproximadamente 3 m<sup>3</sup>. A título de exemplo, um caminhão de transporte de 25 ton apenas consegue transportar um volume total de areia de cerca de 14 m<sup>3</sup>.

Em locais onde não é possível a descarga direta da argila expandida através de caminhões graneleiros, é possível a utilização de semi-reboques equipados com cisternas, capazes de transportar volumes da ordem de 50 m<sup>3</sup>.

Após descarga em obra, é essencial que não exista circulação de caminhões ou qualquer outro veículo de pneus diretamente sobre o material leve. Em casos que seja necessário a circulação de veículos, deverá ser executado um caminho provisório, com espessura mínima de 0,30 m, separando o aterro do material leve por um geotêxtil de separação.

### 5.1.2. COLOCAÇÃO EM OBRA

Na execução do aterro de argila expandida deverá, previamente, realizar-se uma limpeza da vegetação, detritos orgânicos e escombros no local de colocação, tal como acontece, aliás, com a construção de um aterro com qualquer material.

A superfície final terá de apresentar um aspeto liso, desempenado e ajustar-se aos perfis longitudinais e transversais estabelecidos no projeto, não sendo admitidas diferenças em relação às cotas de projeto superiores a 2,5 cm quando se assente uma régua de 5 m sobre ela. A base na qual será colocado o material leve, deverá ser firme.

A colocação da argila expandida pode ser realizada através da descarga direta do caminhão de transporte, da descarga de “bigbags” e da descarga através de cisternas por meio de bombagem, capazes de descarregar 50 m<sup>3</sup> de argila expandida em cerca de 2 horas (Figuras 5-2, 5-3 e 5-4) (Fourré et al, 2009; Jenner et al, 2009).



**Figura 5-2 – Descarga direta no local de obra da argila expandida (Argex, 2011b)**



**Figura 5-3 – Descarga em obra de “bigbags” de argila expandida (Fourré et al, 2009)**



**Figura 5-4 – Descarga em obra através de bombagem da argila expandida de uma cisterna (Jenner et al, 2009)**

O espalhamento da argila expandida pode ser feito com recurso a escavadoras de rasto ou até mesmo manualmente com a utilização de ancinhos (Figuras 5-5 e 5-6).

As escavadoras de rasto não deverão exceder uma tensão de contacto superior a 50 kPa (0,5 kg/cm<sup>2</sup>). Como exemplo, podem ser utilizados equipamentos do tipo Caterpillar, até D6K (13 ton, 125



hp), os quais exercem tensões máximas de contacto da ordem de 40 kPa. Pode ainda ser utilizado equipamento do tipo Caterpillar D7R (25 ton, 240 hp) desde que com rastos do tipo LPG (Low Pressure on Ground), cuja tensão de contacto é de 45 kPa.



**Figura 5-5 – Espalhamento da argila expandida através de uma escavadora de rasto (Aaobe et al, 2005)**



**Figura 5-6 – Espalhamento da argila expandida manualmente com auxílio de ancinhos (Fourré et al, 2009)**

### 5.1.3. COMPACTAÇÃO

A argila expandida deve ser submetida a um processo de compactação, de forma a otimizar as características geotécnicas do material, um conceito de compactação distinto do que se aplica a solos naturais e materiais britados.

O processo de compactação da argila expandida requer uma aplicação de esforços consideravelmente inferiores aos de compactação de aterros com materiais convencionais, devido à menor energia necessária para a realização desse processo. Uma partícula de argila expandida apresenta um peso volúmico inferior face a uma partícula de um material tradicional com o mesmo volume, resultando num maior deslocamento da partícula sob o efeito de uma mesma força. Assim,



para provocar o mesmo deslocamento é necessário dispendar menos energia do que no caso de materiais de peso normal, o que torna evidente que para um aterro leve seja possível empregar equipamentos mais leves de compactação.

À medida que o índice de vazios vai diminuindo e a mobilização de forças de interação entre as partículas é maior, mais difícil se torna o rearranjo das partículas, pelo que esforços de compactação que ultrapassem uma ordem de grandeza considerada ideal terão mais como efeito uma indesejável evolução granulométrica do que a redução dos vazios entre partículas.

Na aplicação da argila expandida é importante assegurar que esta se comporte em conformidade com o desempenho determinado nos ensaios laboratoriais. Para tal o estado de compactação deve ser o mesmo que o utilizado nos ensaios, uma redução de espessura de 10%. Assim, cada camada aplicada deverá sofrer uma redução de espessura de 10% em consequência da operação de compactação.

A compactação apresenta procedimentos que diferem de forma significativa dos procedimentos correntemente empregues em solos de aterro tradicionais, podendo alcançar uma redução de 10% da espessura da camada de argila expandida através da ação quase estática decorrente da circulação de escavadoras de rastos (peso próprio do equipamento) e da ação dinâmica de placas compactadoras (vibração forçada por oscilação de massa excêntrica no interior do equipamento) (Figuras 5-7 e 5-8) (Reis, 2009).

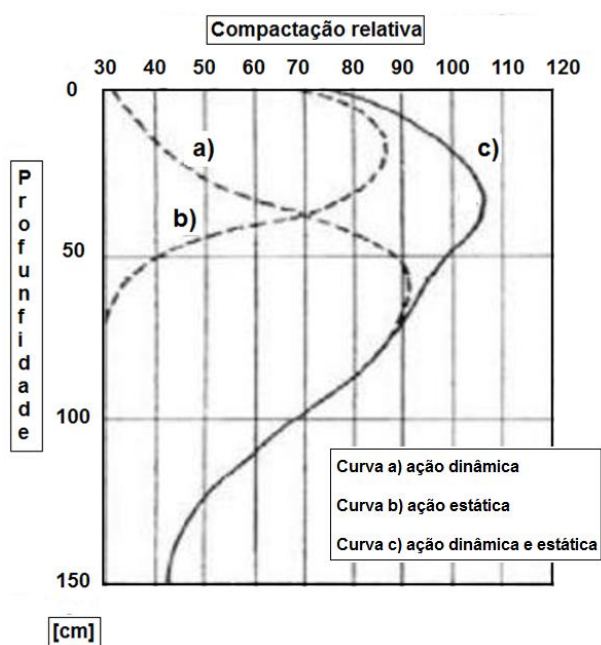


**Figura 5-7 – Processo de compactação da argila expandida resultante da circulação de escavadoras de rasto (Maxit Group, 2010)**



**Figura 5-8 – Processo de compactação pela ação dinâmica de equipamentos compactadores na argila expandida (Fourré et al, 2009; Saint-Gobain Weber, 2011d)**

As ações estáticas exercem efeito máximo ao nível da superfície, enquanto as ações dinâmicas produzem um efeito máximo de compactação a uma profundidade que varia com as características do equipamento. Ensaios realizados confirmam que a ação combinada das ações estática e dinâmica atingem um máximo entre 30 e 70 cm de profundidade (Figura 5-9) (Di Prisco, 2007).



**Figura 5-9 – Efeito, em profundidade, das ações produzidas por placas compactadoras sobre a argila expandida (Di Prisco, 2007)**

A compactação deve ser executada em camadas com espessura que varia com a dimensão do equipamento e com o número de passagens, não devendo em caso algum ultrapassar o 1 metro de espessura.

Com base na experiência adquirida ao longo de diversas obras de aterros com o material de argila expandida a Saint-Gobain Weber aconselha que a operação de compactação seja realizada com a espessura de camada e número de passagens apresentadas na Quadro 5-1.

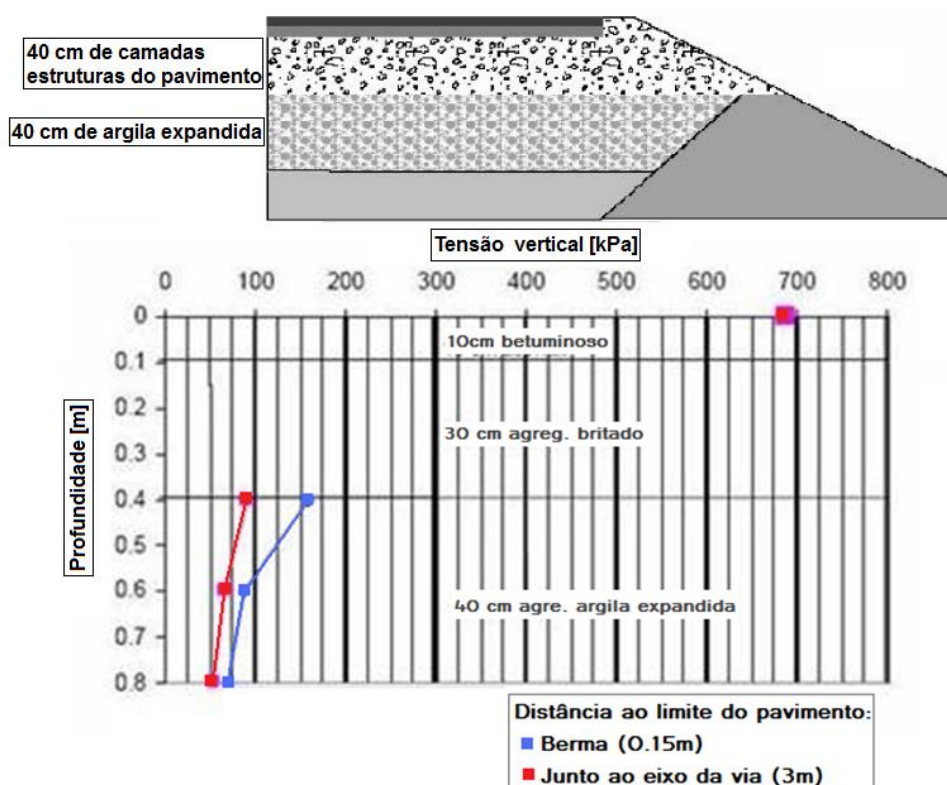
**Quadro 5-1 – Número de passagens aconselhadas na execução de um aterro de argila expandida, segundo o equipamento de compactação e a espessura da camada (Reis e Ramos, 2009a)**

		<i>Espessura de camada [cm]</i>					
		20	40	50	60	70	100
<i>Número de passagens</i>	<i>Placa compactadora 80 kg</i>	5 a 6	7 a 9	-	-	-	-
	<i>Placa compactadora 140 kg</i>	4 a 5	5,5 a 7,5	6,5 a 9	8 a 11	-	-
	<i>Escavadora de rastros</i>	4 a 5	5 a 7	6 a 7	6,5 a 8	7 a 9	9 a 12

Junto a estruturas ou obstáculos, a compactação deve ser realizada com recurso a placas compactadoras vibratórias, em geral de 80 a 140 kg, e de preferência dotadas de perfis de alargamento da base.

De forma a evitar que a redução de espessura se dê por via da fragmentação das partículas, restringe-se a tensão de contacto material/equipamento a valores não superiores a 50 kPa, tal como já foi referido no processo de espalhamento. Na execução de aterros rodoviários e ferroviários pode existir também fragmentação das partículas da argila expandida, pois a parte superior do aterro estará ainda sujeita à ação de compactação das camadas estruturais do pavimento sobrejacente.

No final da década de 90 foram realizados ensaios numa pista experimental constituída por aterros de argila expandida, na Noruega, no âmbito do projeto *Miljølso*, contendo células de medição de tensão instaladas a diversas profundidades (Figura 5-10) (Reis, 2009; Watn, 2008). A pista foi submetida a ação de um veículo com 12,5 ton/eixo cujos pneus exerceram à superfície tensões de 700 kPa. Esta carga foi degradada em profundidade, tendo sido medida uma tensão de 100 kPa, 40 cm abaixo da superfície, onde se encontrava a camada de argila expandida.



**Figura 5-10 – Tensão vertical registrada em profundidade provocada por veículo com 12,5 ton/eixo num aterro de argila expandida (Reis, 2009)**

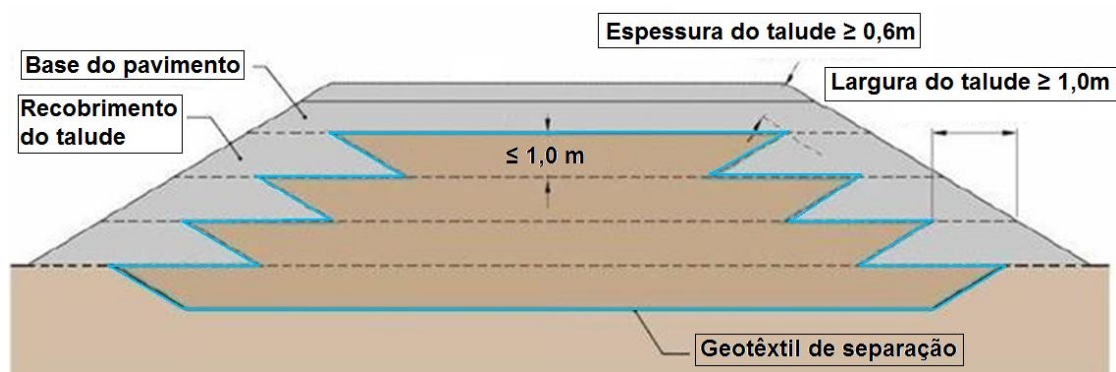
Estes dados forneceram uma informação importante da degradação da tensão aplicada à superfície ao longo da profundidade, sendo visível que para uma camada estrutural de pavimento com espessura de 40 cm, a tensão medida, após essa camada, é reduzida em cerca de 70%.

Neste ensaio a tensão material/equipamento superou o valor aconselhado de 50 kPa. Para tal a espessura da camada estrutural do pavimento deve aumentar.

#### 5.1.4. PORMENORES CONSTRUTIVOS

Um aspeto importante a ter em conta quando a realização de um aterro de argila expandida consiste no confinamento lateral das partículas, quando não existe suporte da própria estrutura. De modo a ultrapassar esta exigência aconselha-se a executar uma de duas possibilidades.

Uma primeira consiste na execução de espaldares com solos ou materiais com peso volúmico tradicional, de preferência, criando prismas de forma trapezoidal com altura igual à da camada de argila expandida e largura mínima de 1 m no topo, largura esta que deve ter em conta o equipamento de compactação. Cada um dos prismas de aterro com peso volúmico tradicional é executado antes da camada de aterro leve, devendo ser interposto um geotêxtil de separação entre estes prismas e o aterro leve (Figura 5-11) (Reis, 2009).



**Figura 5-11 – Confinamento da argila expandida por meio de espaldares de material tradicional (Reis, 2009)**

Tratando-se de um material sem finos, é necessário evitar a migração dos finos dos materiais confinantes para o espaço vazio entre as partículas da argila expandida. Para tal é aconselhado um geotêxtil (Figura 5-12) à base de polipropileno com massa volúmica superior a  $200 \text{ g/m}^2$ , com permeabilidade transversal (permitindo a passagem de água e retendo as partículas finas do solo) e uma resistência à tração de  $8 \text{ kN/m}$  (Texsa, 2011).



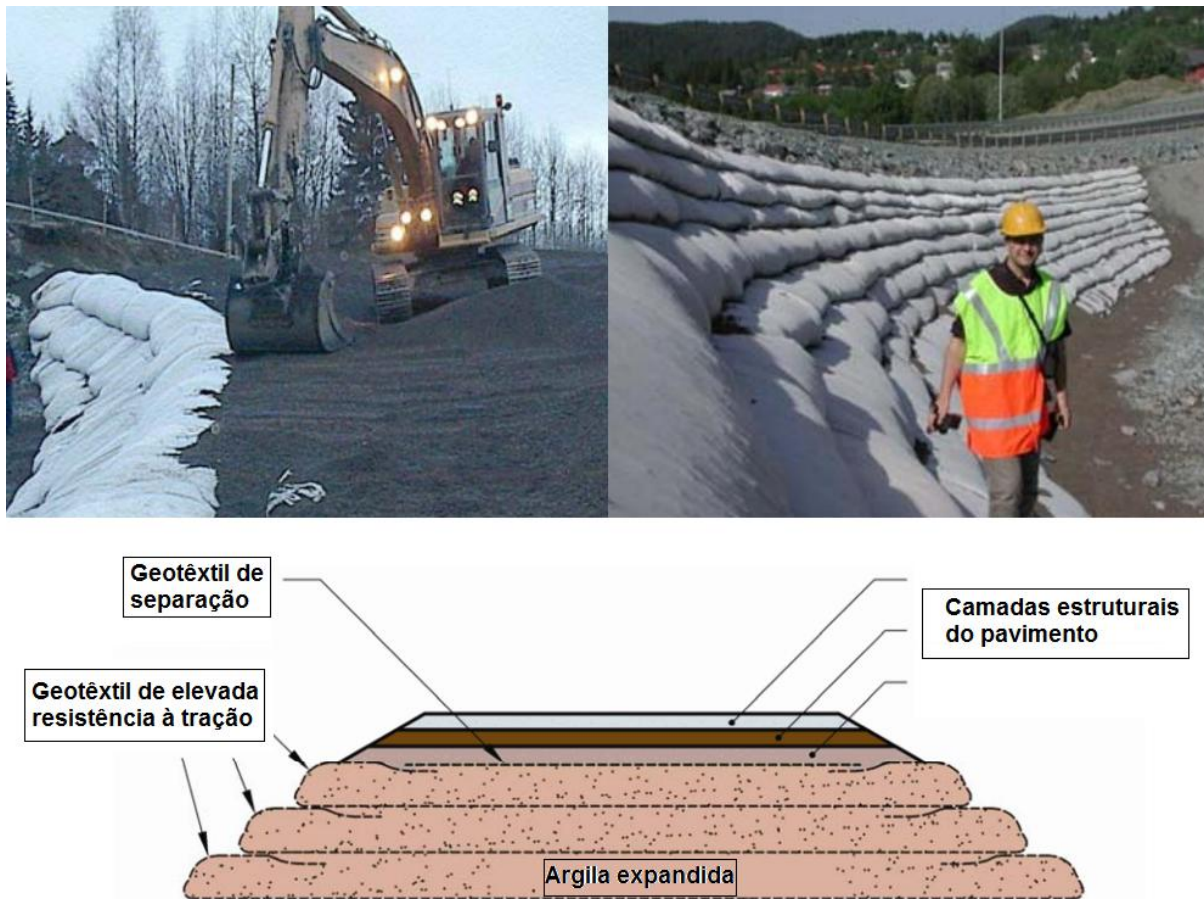
**Figura 5-12 – Utilização de geotêxtil de separação na base do aterro de argila expandida (Maxit Group, 2010)**

Uma segunda opção, ainda em desenvolvimento, consiste no confinamento por meio de geotêxteis ancorados sob cada uma das camadas de aterro leve a executar e dobrados para o interior do aterro, tensionando ligeiramente o geotêxtil. Para esta solução de confinamento é necessário utilizar um geotêxtil com maior resistência à tração que o utilizado normalmente para



separação. O geotêxtil deve também apresentar um comportamento estável à reação de raios ultravioleta, uma vez que não será coberto.

Nesta situação, a execução de espaldares com peso volúmico tradicional é executado posteriormente ao aterro leve (Figura 5-13) (Watn et al, 2007).



**Figura 5-13 – Confinamento da argila expandida por meio de geotêxtil (Watn et al, 2007; Saint-Gobain Weber, 2011d)**

Esta solução permite também ultrapassar o declive lateral limite do talude do aterro de argila expandida que consiste no ângulo de atrito interno determinado em laboratório.

## 5.2. POLIESTIRENO EXPANDIDO

### 5.2.1. TRANSPORTE

O transporte do poliestireno expandido até ao local de execução do aterro é também realizado, em regra, através de camiões de transporte rodoviário. Em geral, os camiões utilizados são semi-reboques com capacidade de transporte de um volume de  $65 \text{ m}^3$  (à semelhança do referido para a argila expandida), conseguindo-se uma elevada eficiência em transporte em comparação a um material tradicional de aterro (Figura 5-14).



**Figura 5-14 – Camião semi-reboque de 25 ton para transporte de blocos de EPS (ATLASEPS, 2011)**

### 5.2.2. COLOCAÇÃO EM OBRA

Os blocos de EPS podem ser retirados do veículo de transporte e transportados para a zona de obra através de empilhadores telescópicos ou manualmente (Figuras 5-15 e 5-16).



**Figura 5-15 – Receção e descarga de 65 m<sup>3</sup> de blocos de EPS (Federal Highway Administration, 2006)**



**Figura 5-16 – Transporte dos blocos de EPS do veículo de transporte para a zona de obra (ATLASEPS, 2011)**

Os blocos de EPS podem ser instalados à mão, necessitando apenas da mão-de-obra de duas pessoas para a elevação de cada bloco (Figura 5-17).



**Figura 5-17 – Instalação de bloco de EPS (ATLASEPS, 2011)**

A instalação dos blocos é realizada através da colocação dos mesmos com juntas desencontradas verticalmente (Maccarini e Aguiar de Sá, 2011). Sobre a primeira camada de blocos



é depositada uma outra camada com juntas desencontradas horizontalmente e assim sucessivamente, formando um tronco de pirâmide de forma a distribuir a carga (Figura 5-18).



**Figura 5-18 – Colocação dos blocos de EPS com juntas horizontais e verticais desencontradas (Arrelano et al, 2011)**

### 5.2.3. COMPACTAÇÃO

O poliestireno expandido devido à sua forma em bloco não necessita de operação de compactação, sendo esta realizada na fase de moldagem em fábrica. A compactação dos aterros laterais de proteção, em material tradicional, é executada através de equipamentos compactadores convencionais. Na realização dessa compactação é essencial não danificar os blocos.

### 5.2.4. PORMENORES CONSTRUTIVOS

A base de aplicação dos blocos EPS deve estar acima do nível freático. O EPS, devido ao facto de conter ar na sua estrutura interna, é suscetível à ocorrência de fenómenos de flutuabilidade, isto é, quando os blocos são afetados por pressões hidrostáticas existe possibilidade de surgir flutuação. Quando necessária a aplicação do EPS sob o nível freático, deverão ser aplicadas camadas de aterro tradicional sobre os blocos, com peso suficiente para contrariar as pressões hidrostáticas, que se possam instalar.

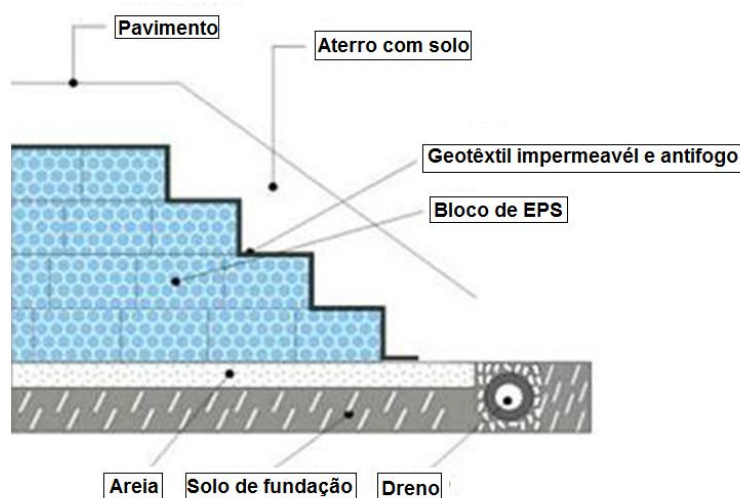
A primeira camada de blocos deve ser assente totalmente sobre uma camada de areia com espessura dependente do solo que vai cobrir e dos equipamentos a utilizar para o espalhamento e compactação da mesma.

A camada de areia permite a nivelção e a separação dos blocos do solo inferior.

O aterro deve possuir no mínimo duas camadas de blocos de EPS, e nas laterais do mesmo, os blocos utilizados têm de ser inteiros. Os blocos que são submetidos a cortes devem ser colocados no centro das camadas.

O assentamento dos blocos é realizado com base na modulação do projeto e deve-se evitar juntas ou vazios entre blocos com mais de 2 cm (Figura 5-19).

A espessura do solo que cobre as superfícies inclinadas não deve ser inferior a 25 cm e deve-se ter em conta a existência ou não de vegetação, aumentado a espessura se necessário.



**Figura 5-19 – Esquema de colocação de blocos de EPS (Construpor, 2005)**

É necessário impedir o contacto do EPS com substâncias que podem dissolver ou propagar fogo. Apesar do EPS ser do tipo "auto extingüível", é imprescindível proteger os blocos com um geotêxtil impermeável e resistente ao fogo. O geotêxtil deve ser à base de polipropileno com massa volúmica de  $250 \text{ g/m}^2$ , resistente à perfuração, impermeável e antifogo (Plastimar, 2011b) ou geomembrana de PEAD texturada (melhorando o coeficiente de atrito entre blocos de EPS para 1 (Sheeley e Negussey, 2004)).

Tal como referido anteriormente, o coeficiente de atrito entre blocos é da ordem de 0.65, ou seja, correspondente a um ângulo de resistência ao corte de  $27^\circ$ .

Com o objetivo de aumentar o ângulo de atrito interno e conferir uma maior união à estrutura de blocos de EPS são consideradas algumas soluções, tais como, o contraventamento dos blocos através de cintas, permitindo evitar espaços vazios entre os blocos, a utilização de garras metálicas de fixação entre os blocos (Figura 5-20), vertical e horizontalmente, e a execução de muros de suporte/confinamento (Frydenlund e Aaboe, 2001).



**Figura 5-20 – Utilização de garras metálicas como meio de travamento dos blocos de EPS (Spasojevic et al, 2011)**

Após instalação dos blocos é essencial que não existam tensões sobre o EPS que ultrapassem o seu limite elástico, podendo existir deformações irreparáveis que serão refletidas na estrutura. Como meio de prevenção, aconselha-se a utilização em projeto de uma tensão máxima de trabalho correspondente a 1% de deformação e a construção de elementos de proteção em betão ou a execução de uma camada de material tradicional sobre a estrutura de blocos, dissipando as tensões instaladas.

### 5.3. ESPUMA DE VIDRO

A espuma de vidro apresenta características construtivas muito semelhantes à argila expandida. O meio de transporte, a colocação do material em obra e os pormenores construtivos são realizados da mesma maneira para os dois materiais.

As técnicas de compactação também são efetuadas com os mesmos equipamentos, número de passagens e precauções que a argila expandida. Apenas o valor total da redução da espessura, após aplicada, varia. O fator de compactação a utilizar é da ordem de 1.3, em conformidade com o desempenho determinado nos ensaios laboratoriais (Misapor, 2011c), ou seja, uma redução da espessura da camada de cerca de 30%. O aumento da redução da espessura da camada em comparação à argila expandida é justificado pela maior percentagem de espaços vazios existentes no material.

Assim, não serão descritas novas condições de colocação em obra, sendo válidas as já apresentadas para a argila expandida (Figuras da 5-21 a 5-26).



**Figura 5-21 – Camião semi-reboque de 25 ton para o transporte de espuma de vidro (Aaobe et al, 2005)**



**Figura 5-22 – Descarga direta no local de obra da espuma de vidro (Frydenlund e Aaboe, 2002)**



**Figura 5-23 – Descarga em obra de “bigbags” de espuma de vidro (Harley, 2003)**





**Figura 5-24 – Espalhamento da espuma de vidro através de uma escavadora de rasto (Aaobe et al, 2005)**



**Figura 5-25 – Processo de compactação da espuma de vidro resultante da circulação de escavadoras de rasto (Frydenlund e Aaboe, 2002)**



**Figura 5-26 – Utilização de geotêxtil de separação na base do aterro (Maxit Group, 2004)**

## 5.4. ENSAIOS PARA O CONTROLO DE COLOCAÇÃO

Os materiais leves em estudo são habitualmente diferenciados pela granulometria e pela resistência à compressão. Deste modo a própria entidade produtora executa ensaios laboratórios que permitem caracterizar os materiais produzidos, existindo para cada material uma ficha técnica. Contudo, nas aplicações no domínio da Geotecnia, as características dos materiais dependem muito da forma como estes são colocados e compactados em obra. Nestas condições, são escassos os ensaios específicos realizados em laboratório que visam, por exemplo, a definição das características de resistência ao corte ou de deformabilidade. Os poucos resultados disponíveis correspondem a ensaios executados para fins de investigação.

Devido às características destes materiais, nomeadamente a granulometria, existe alguma dificuldade de utilizar os procedimentos de ensaios realizados nos materiais tradicionais, sendo necessárias, muitas vezes, algumas adaptações dos mesmos.

Os países nórdicos, com maior experiência na utilização de materiais leves, realizam alguns ensaios “in-situ”, com o intuito de conhecer o peso volúmico final do material leve após colocação e controlar o comportamento das obras quanto aos assentamentos.

Em seguida são apresentados os ensaios “in-situ” realizados nas obras referidas na dissertação.

### 5.4.1. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E TEOR EM ÁGUA

Um dos métodos mais utilizados para a determinação da densidade e teor em água “in-situ” em materiais leves baseia-se na introdução de um cilindro em aço com um raio de 570mm até uma profundidade de 270mm, igualando a camada superior do material (Frydenlund e Aaboe, 2002). Após remoção do material do interior do cilindro, este é pesado e seco. Para conhecimento do volume total de material retirado é colocado um plástico fino sobre a cavidade e preenchido com água, reconhecendo assim o volume (Figura 5-27).



**Figura 5-27 – Figura da esquerda: cilindro após remoção do solo interior; Figura da direita: película de plástico sobre o cilindro (Norwegian Public Roads Administration, 2007)**



O método “in-situ” descrito é utilizado com grande frequência e comparado com resultados de ensaios em laboratório, apresentando uma grande exatidão. Apesar da simplicidade do ensaio podem ocorrer erros, por exemplo, quando é aprisionado ar enquanto é colocada a película plástica sobre o cilindro, influenciando o volume, e quando existe uma compactação extra na introdução do cilindro, apertando o material contra o mesmo. Contudo, os erros ocorridos não apresentam grande significado.

O método de cálculo de densidade e teor em água “in-situ” apresentado foi utilizado na construção de um aterro leve na estrada nacional Rv120 e na construção de uma via pedestre/ciclovía, ambas na Noruega.

Em Portugal, foi desenvolvido um equipamento específico para a realização do ensaio em materiais leves (Caldeira et al, 2009). Este equipamento permite a remoção do material do interior do cilindro na qual é realizada através de vácuo gerado por um aspirador. Através da penetração do tubo do aspirador, o material leve solta-se e ascende, sendo de seguida feitas as mesmas medições que no método anterior. O peso volúmico é estimado através do volume ocupado pelo cilindro cravado no aterro e o peso do material extraído (Figura 5-28).



**Figura 5-28 – Método de determinação de densidade e teor de água através de um aspirador de vácuo (Caldeira et al, 2009)**

#### 5.4.2. ENSAIO “FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER”

O FWD baseia-se na aplicação de uma carga sobre uma placa circular em contacto com o pavimento, simulando a roda de um veículo em andamento. No centro da placa circular estão introduzidos sensores de deflexão.

O aparelho permite registar os valores das deflexões reversíveis realizadas pelo pavimento quando solicitado por uma carga dinâmica durante um tempo de aplicação. As deflexões são traduzidas graficamente por linhas de assentamentos reversíveis (Alltech, 2011).

O equipamento é utilizado para avaliar o comportamento elástico de pavimentos flexíveis e rígidos. Geralmente é constituído por um reboque, rebocado por um veículo normal (Figura 5-29).



**Figura 5-29 – Equipamento FWD (Alltech, 2011)**

Em 2002, o FWD foi utilizado experimentalmente para análise de um aterro temporário executado com o material leve de espuma de vidro na estrada E6 Eggemarka, na Noruega.

#### 5.4.3. ENSAIO “CONE PENETRATION TEST”

O ensaio “in-situ” Cone Penetration Test (CPT) tem como objetivo determinar as propriedades de um solo, delineando a estratigrafia do mesmo (Norwegian Public Roads Administration, 2007). O ensaio foi desenvolvido, em 1950, no Laboratório de Mecânica dos Solos na cidade de Delft, na Holanda, e é um dos ensaios mais usados para investigação de solos.

O aparelho é constituído por uma sonda com vários sensores introduzidos na ponta cônica que permitem a medição contínua e em tempo real da tensão exercida pelo solo à medida que esta o atravessa a uma velocidade de 2 cm/s (Figura 5-30) (Georgia Tech Scholl of Civil & Environmental Engineering, 2011).



**Figura 5-30 – Sonda cônica com sensores de medição de carga (Georgia Tech Scholl of Civil & Environmental Engineering, 2011)**

Apesar de o CPT ser usado normalmente em materiais tradicionais, existiu a necessidade de o utilizar também em materiais leves, não sendo completamente correto a sua utilização, uma vez que a ponta cônica ao ser introduzida no solo pode esmagar o material, levando a uma alteração das suas propriedades, nomeadamente, o ângulo de atrito interno.

No aterro temporário realizado com material leve de espuma de vidro na estrada E6 Eggemarka, na Noruega, o ensaio CPT foi executado com sucesso, uma vez que foi possível determinar a capacidade de carga ao longo da profundidade, apesar de ter ocorrido algum esmagamento.

#### 5.4.4. ENSAIO DE CARGA EM PLACA CLÁSSICO

O ensaio de carga em placa consiste na aplicação de uma carga vertical de forma gradual sobre uma placa lisa e rígida de dimensões variáveis (30x30 a 100x100cm).

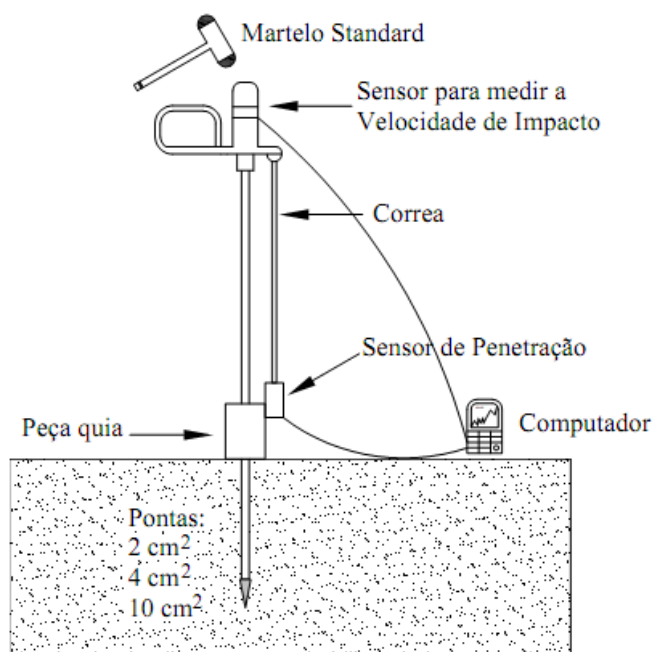
O ensaio permite conhecer o comportamento real do terreno quando submetido a cargas, normalmente superiores àquelas que irá suportar após a construção. A partir deste ensaio pode-se estimar o módulo de deformabilidade do solo.

A realização do ensaio diretamente sobre materiais leves não é o método mais adequado, devido à baixa sensibilidade do equipamento, podendo ocorrer esmagamento.

O ensaio foi utilizado no controlo pós-obra no aterro leve reforçado no alargamento da autoestrada A31, em França, tendo o Projetista chamado à atenção que não seria o método mais adequado para materiais leves.

#### 5.4.5. ENSAIO COM O PENETRÓMETRO PANDA

O penetrómetro Panda (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté) é considerado um aparelho de uso rápido e de baixo valor económico (Guedes, 2008). O ensaio baseia-se na introdução de uma barra de aço no solo através de um martelo padrão (Figura 5-31).



**Figura 5-31 – Princípio de funcionamento do penetrómetro Panda (Guedes, 2008)**

Após cada pancada, dada pelo martelo, existe um sensor que contabiliza a velocidade do impacto, permitindo determinar a energia transmitida ao resto do dispositivo. Através do valor de introdução da barra no solo calcula-se a resistência de introdução da ponta cónica da barra. Existem pontas cónicas de 2 cm<sup>2</sup> até 10 cm<sup>2</sup>. As pontas com maior diâmetro reduzem consideravelmente o atrito lateral nas barras, usadas principalmente para reconhecimento de solos enquanto as pontas com 2 cm<sup>2</sup> servem para a realização de ensaios de compactação. A utilização do ensaio com o penetrómetro Panda em materiais leves tem como objetivo controlar o seu grau de compactação.

O ensaio em questão foi utilizado para controlo pós-obra no aterro leve reforçado no alargamento da autoestrada A31, em França.

## 6. OBRAS REALIZADAS COM UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS LEVES

Em seguida são apresentadas algumas obras nacionais e internacionais em que são utilizados a argila expandida, o poliestireno expandido e a espuma de vidro.

A apresentação destas obras é feita segundo uma sequência idêntica à apresentada no capítulo 3, considerando as 4 áreas então focadas de maior componente geotécnica: a redução de assentamentos associados à construção de aterros, a redução de cargas verticais sobre estruturas subterrâneas, a redução dos impulsos horizontais sobre estruturas e o melhoramento das condições de estabilidade de taludes.

### 6.1. REDUÇÃO DE ASSENTAMENTOS ASSOCIADOS À CONSTRUÇÃO DE ATERROS

#### 6.1.1. ARGILA EXPANDIDA

##### REABILITAÇÃO DE UM ENCONTRO DE PONTE, PORTUGAL

Em 2001, na Autoestrada A25, no lanço Pirâmides – Barra, em Aveiro, foi iniciado um projeto de reabilitação e reforço na ponte sobre o Rio Boco. Na data da reabilitação, a ponte possuía pouco mais de 14 anos.

A ponte é constituída por um tabuleiro de laje vigada com 175m de comprimento e 29m de largura (Moreira et al, 2009).

O referido projeto foi realizado pelo Gabinete de Estruturas e Geotecnia (GEG), a pedido da Autoestradas do Norte (AENOR).

O principal problema centrou-se no encontro poente da ponte, apresentando assentamentos elevados, da ordem de 0.50m. Em consequência disso, existiu uma rotação do tramo da margem poente (Figuras 6-1 e 6-2).



**Figura 6-1 – Assentamento no encontro de ponte (Moreira et al, 2009)**



**Figura 6-2 – Rotação nas extremidades do tramo de margem poente (Moreira et al, 2009)**

Os resultados de caracterização do solo permitiram reconhecer o local de implantação da ponte, predominantemente aluvionar, repousando sobre arenitos e argilas. Após análise dos resultados da prospeção efetuada e na modelação da execução do aterro existente, procurou-se estimar os assentamentos por este induzido, tal como a sua progressão no tempo.

Na segunda fase do projeto, foram apresentadas duas soluções de reabilitação e reforço para o encontro da ponte. Uma primeira solução consistia no alívio de carga ao nível do aterro, com substituição do aterro existente por um com material de argila expandida, limitando os assentamentos totais, semelhantes aos já ocorridos. A segunda solução consistia no reforço dos solos de fundação sob o maciço de terra armada, através da materialização por colunas de “*jet-grouting*” no interior do maciço de fundação.

Por se revelar mais vantajosa do ponto de vista técnico/económico, a solução escolhida envolveu a utilização de argila expandida. A solução de substituição do aterro existente por um aterro com material leve permitiu aliviar o estado de tensão no maciço, transitando as camadas argilosas de um estado de consolidação normal para um estado de sobreconsolidação, como se o atual aterro tivesse funcionado como uma pré-carga.

O material leve descrito em projeto teria uma granulometria de 10 a 20 mm, com um peso volúmico aparente seco de cerca  $2,75 \text{ kN/m}^3$ , para a realização de um aterro com a espessura entre 2 a 2,5 m. Foram colocadas geogrelhas de reforço e um geotêxtil de separação nas interfaces da camada de material leve com as restantes camadas, de forma a evitar a penetração destes materiais no interior da argila expandida. Sobre esta camada foi colocado um aterro compactado e as diversas camadas de pavimento, com uma espessura total de, aproximadamente, 0,70m.

Com o objetivo de quantificar os ganhos pela substituição do aterro existente por argila expandida, calculou-se a redução da carga transmitida pelo aterro (o valor de projeto do peso volúmico da argila expandida utilizado foi de  $4,125 \text{ kN/m}^3$ ) (Quadro 6-1).

**Quadro 6-1 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por argila expandida**

	<b>Camadas estruturais</b>	<b>Peso volúmico [<math>\text{kN/m}^3</math>]</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Tensão do aterro sobre a fundação [kPa]</b>
<i>Aterro inicial</i>	Material tradicional	18	7,5	135
<i>Aterro com argila expandida</i>	Material tradicional	18	5,5	107
	Argila expandida	4,13	2	

Com base no Quadro 6-1 é possível constatar uma redução de cerca de 30 kPa da tensão vertical após substituição do aterro inicial por material leve. Assim, ao nível da fundação, foi estimado uma redução superior a 20 % da carga transmitida.

Na presente obra, a utilização de material leve, face à solução concorrente, permitiu facilitar a execução técnica da obra.

Como anotação, é possível observar que a espessura da camada de pavimento admitido, de 0,70m, pareceu suficiente para que a tensão material/equipamento não fosse superior a 50 kPa, segundo a informação recolhida sobre a aplicação deste material.

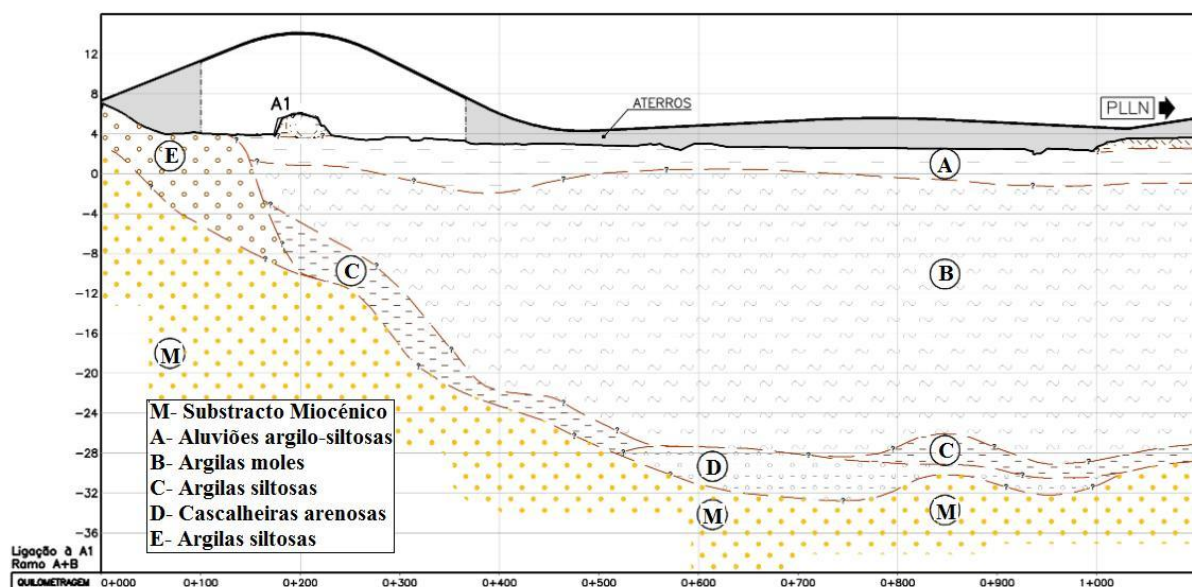
#### FUNDAÇÃO DOS ATERROS DE ACESSO A UMA AUTOESTRADA, PORTUGAL

Em 2010, na Autoestrada do Norte (A1) e na Estrada Nacional 1 (EN1), junto a Castanheira do Ribatejo, foram iniciados os trabalhos de acessos rodoviários de ligação à Plataforma Logística de Lisboa Norte. O projeto de acessibilidades situava-se sobre a bacia aluvionar da margem direita do



Rio Tejo, constituída por elevadas espessuras de aluviões lodosos, provocando um condicionante negativo à execução da obra (Brito et al, 2010).

Com base nas campanhas de prospeção e ensaios executados foi possível caracterizar as condições de fundação, às quais estava associado uma elevada espessura de aluviões lodosos, atingindo uma profundidade máxima de 34 m (Figura 6-3).

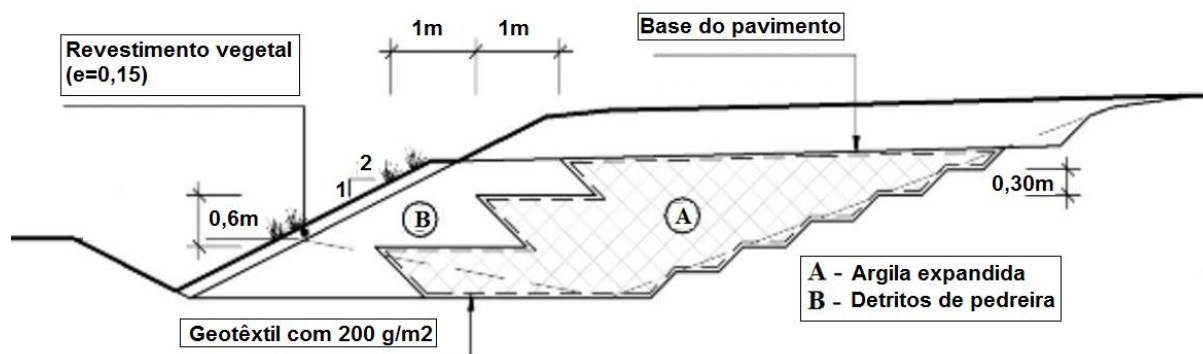


**Figura 6-3 – Perfil geológico do acesso à Autoestrada do Norte, em Castanheira do Ribatejo**

Como soluções para a fundação dos aterros dos acessos optou-se por três soluções: a realização de aterros de endentamento com materiais leves, a realização de plataformas de transferência de cargas fundadas por estacas e a realização de aterros de pré-carga para consolidação forçada e uma posterior substituição por materiais leves. Em todas as soluções, a argila expandida foi utilizada, devido ao seu baixo peso volúmico. As soluções adotadas nos acessos justificaram-se pela necessidade de conceber um aterro que não induzisse assentamentos adicionais nos aterros existentes na A1 e EN1.

A solução de realização de aterros de endentamento (ligação entre o aterro antigo e o novo) foi aplicada nas ligações de ramos nos quais a altura de aluviões lodosos é menor (aspeto construtivo presente na Figura 6-4). Esta solução permitiu reduzir a carga imposta pelo novo aterro, cuja espessura não ultrapassou os 2 m, minorando os assentamentos.





**Figura 6-4 – Perfil transversal tipo do aterro de endentamento com argila expandida**

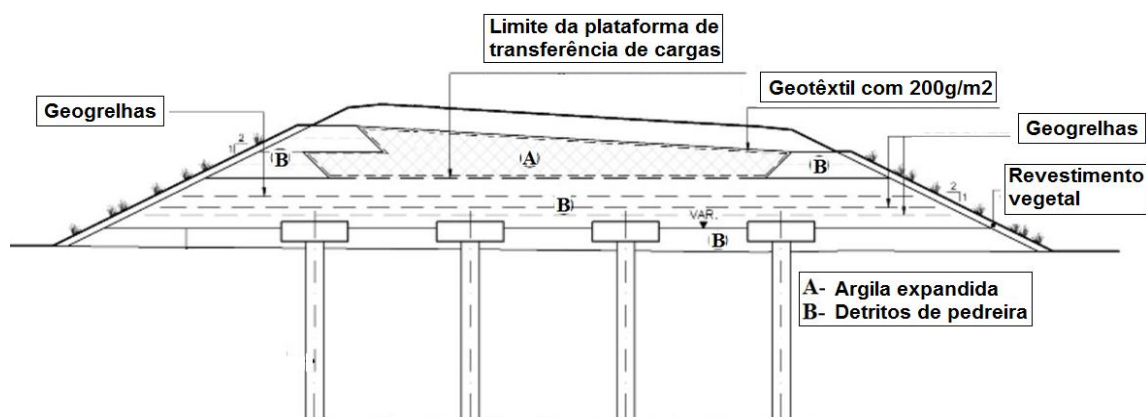
A quantificação dos ganhos pela utilização da argila expandida face ao material tradicional é estimada no Quadro 6-2 (o valor de projeto do peso volúmico da argila expandida utilizado foi de  $4,125 \text{ kN/m}^3$ ).

**Quadro 6-2 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por argila expandida**

	<b>Camadas estruturais</b>	<b>Peso volúmico [<math>\text{kN/m}^3</math>]</b>	<b>Área transversal [<math>\text{m}^2</math>]</b>	<b>Carga do aterro sobre a fundação [<math>\text{kN/m}</math>]</b>
Aterro inicial	Detritos de pedra	18	7,78	295
	Material tradicional	20	7,79	
Aterro com argila expandida	Detritos de pedra	18	7,78	172
	Argila expandida	4,13	7,79	

A utilização da argila expandida permitiu uma redução da carga do aterro sobre a fundação de cerca de 120 kN por metro de comprimento do aterro, totalizando numa redução em cerca de 40%.

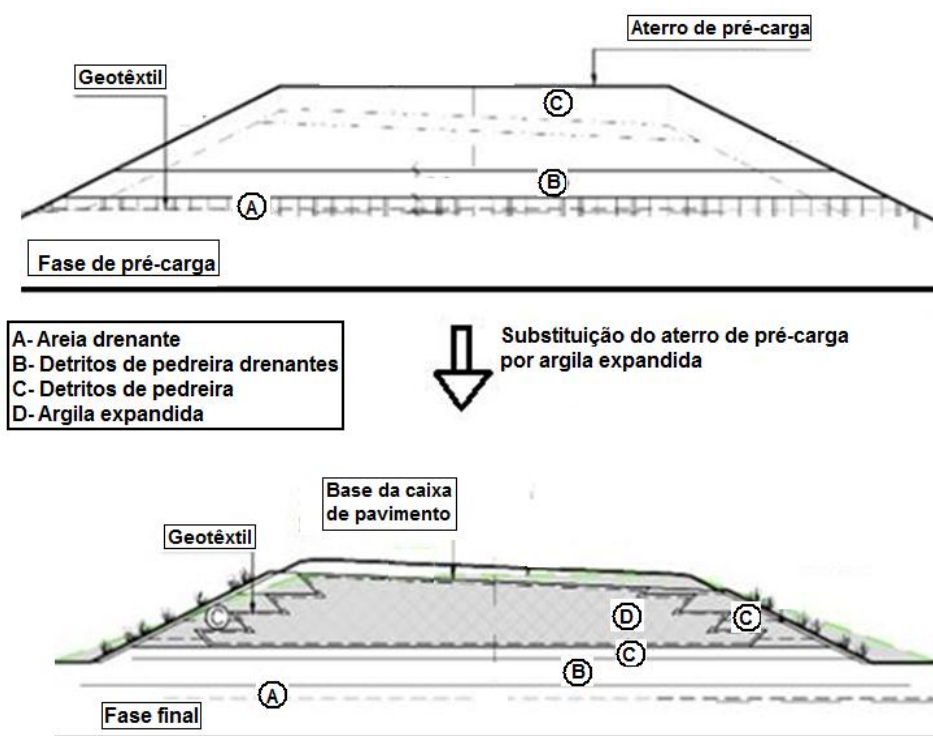
As plataformas de transferência de cargas foram necessárias para a zona com espessura de aluviões mais elevada, onde os acessos à A1 exigiam a realização de aterros de alargamento aos existentes e de novos aterros. Os aterros existentes da A1, realizados há mais de 30 anos, apresentavam um estado de consolidação finalizado, sendo necessário conceber uma solução de fundação dos novos aterros que não induzissem assentamentos adicionais. A solução considerada incidiu na execução de plataformas de transferência de carga reforçadas com geogrelhas. A plataforma é constituída por uma camada de detritos de pedra, sobre a qual são executadas estacas e maciços de encabeçamento. Seguidamente é construído um aterro com argila expandida, de forma a reduzir o peso sobre a fundação (Figura 6-5).



**Figura 6-5 – Perfil transversal tipo das plataformas de transferência de carga com aterro em argila expandida**

Relativamente à terceira solução, a execução de aterros de pré-carga permitiu a consolidação forçada da zona de aluviões.

A realização de aterros pesados, constituídos por detritos de pedra drenantes, e em seguida, a substituição desses aterros por argila expandida permitiu consolidar a zona dos aluviões (Figura 6-6). A pré-carga realizada teve que atuar o tempo necessário de modo a induzir a totalidade dos assentamentos previstos.



**Figura 6-6 – Secção transversal tipo dos aterros de pré-carga**

### RECALÇAMENTO DE PAVIMENTOS DE EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS, PORTUGAL

Em 2007, na antiga Trefilaria, localizada em Sacavém, junto ao rio Trancão, finalizou-se a construção de um conjunto de armazéns (Figura 6-7) (Pinto et al, 2010).

Os edifícios foram construídos sobre uma camada de aterro que assenta sobre solos aluvionares da bacia do rio Trancão. Esta camada de aterro, com uma espessura máxima de 3 m, foi executada com o objetivo de elevar as estruturas acima do nível de cheia.

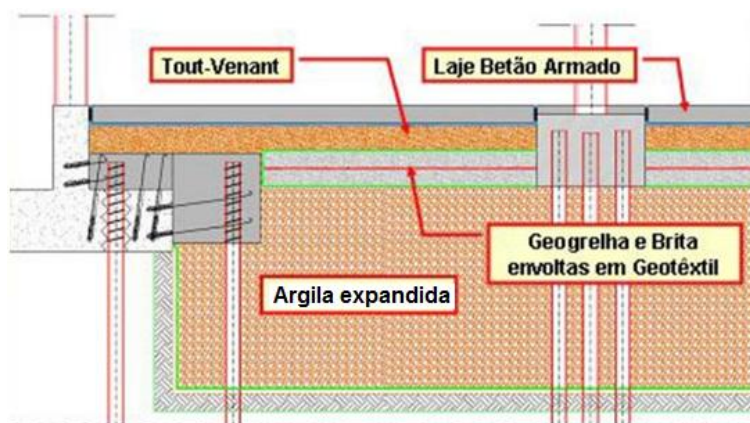


**Figura 6-7 – Armazéns na zona da antiga Trefilaria (Pinto et al, 2010)**

A monitorização do comportamento das estruturas mostra que a evolução dos assentamentos associados a fenómenos de consolidação não era compatível com a utilização dos armazéns. Assim, foi reconhecida a necessidade de recalçamento das fundações existentes e da realização de novas fundações para os pavimentos térreos.

Foram então implementadas algumas técnicas de reforço de fundações e substituição de aterros existentes.

Nas zonas onde se verificou a existência de pequenas taxas de assentamento, adotou-se uma solução de substituição total do material constituinte dos aterros por argila expandida. A substituição permitiu aumentar o grau de consolidação dos solos aluvionares e, conseqüentemente, a redução da taxa de assentamentos (Figura 6-8).



**Figura 6-8 – Perfil tipo da solução de substituição do aterro existente por argila expandida**

A implementação desta solução implicou a demolição do massame existente, a escavação do aterro e a posterior colocação do material leve, devidamente envolvido em geotêxtil, de forma a minimizar a sua colmatação a longo prazo. Os novos pavimentos térreos foram executados em lajes fungiformes, fundados em microestacas até uma profundidade máxima de 65 m, garantindo que alcançava o substrato Miocénico (Figura 6-9).



**Figura 6-9 – Execução das microestacas no interior dos armazéns (Pinto et al, 2010)**

Com o objetivo de quantificar os ganhos pela substituição do aterro existente por argila expandida, calculou-se a redução da carga transmitida pelo aterro (o valor de projeto do peso volúmico da argila expandida utilizado foi de  $4,125 \text{ kN/m}^3$ ) (Quadro 6-3).

**Quadro 6-3 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por argila expandida**

	<b>Camadas estruturais</b>	<b>Peso volúmico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Tensão do aterro sobre a fundação [kPa]</b>
<i>Aterro inicial</i>	<i>Aterro de elevação</i>	20	3	110
	<i>Aterro Areno-argiloso com zonas pedregosas</i>	20	2,5	
<i>Aterro com argila expandida</i>	<i>Aterro de argila expandida</i>	4,13	4,3	40
	<i>Aterro Areno-argiloso com zonas pedregosas</i>	20	1,2	

Com base no Quadro 6-3 é possível constatar uma redução da tensão vertical sobre a fundação de cerca de 70 kPa, após substituição do aterro de elevação por argila expandida. Assim, ao nível da fundação, foi estimada uma redução superior a 60 % da carga transmitida.

#### LINHA FÉRREA DE ALTA VELOCIDADE, FINLÂNDIA

Em 2004, próximo da cidade finlandesa de Lahti, a cerca de 100 km de Helsínquia, foi realizado um troço de linha de comboio rápido com aproximadamente 1 km (Reis, 2010).

Na zona entre as localidades de Luhtikylä e Hakosilta, foi identificado um solo de natureza silto-argilosa, com uma resistência ao corte entre 15 e 30 kPa e teores de água entre 50 e 90%, atingindo uma profundidade média de 45m até ao substrato resistente.

Perante o cenário geotécnico, uma das soluções apresentadas para a fundação do aterro consistia na execução de fundações indiretas, implicando estacas fundadas a elevadas profundidades. Por motivos económicos, essa solução foi abandonada e sugerida uma outra baseada na estabilização em profundidade do solo com colunas de cal/cimento e a utilização de argila expandida na realização do aterro ferroviário de forma aligeirar as cargas permanentes.

A opção de utilização do material leve teve ainda em consideração as vibrações produzidas pelos comboios, tendo sido determinada a velocidade de propagação das ondas para a análise de fenómenos de ressonância devido à passagem do comboio.

As colunas de cal/cimento foram executadas com um diâmetro de 700 mm e dimensionadas para resistir a esforços de corte de 150 kPa. Após secagem das colunas foi aplicada uma camada de argila expandida, envolvida por um geotêxtil de reforço.

A argila expandida apresentou nesta obra uma solução para a redução das tensões verticais atuantes no solo de fundação, reduzindo o peso do aterro em cerca de 80% face aos materiais tradicionais.

No total da obra, foram utilizados 15 000 m<sup>3</sup> de argila expandida em aterros leves, vias de acessos e obras de arte (Figura 6-10).





**Figura 6-10 – Linha de comboio na zona do aterro com materiais leves (Maxit Group, 2004)**

#### VIA RODOVIÁRIA SOBRE SOLOS MOLES, PAIS DE GALES

Em 2003 na cidade de Cardiff, no País de Gales, iniciou-se a construção do empreendimento International Sports Village, visando a requalificação de uma zona afeta às atividades portuárias e industriais (Reis, 2010).

De modo a melhorar os acessos ao empreendimento, foi construído uma nova via rodoviária de acesso, a qual ficou situada numa zona com fracas características geológicas e geotécnicas (solo de fraca resistência e pouco consolidado). O terreno em questão era constituído por camadas argilosas moles, de origem aluvionar, sobre as quais se encontrava depositada uma espessa camada de resíduos sólidos urbanos. Como solução, o Projetista optou pela realização de uma compensação da sub-base, substituindo uma espessura do solo por material de argila expandida. A substituição do solo existente por material leve permitiu manter as tensões instaladas no terreno iguais as que existiam antes da construção da via.

No total foram instalados  $12\,000\text{ m}^3$  de argila expandida fração 10-20 mm, transportados até a local de obra em camiões de  $50\text{ m}^3$ . A utilização deste material leve permitiu reduzir a espessura de escavação a apenas 1 m.

#### **6.1.2. POLIESTIRENO EXPANDIDO**

#### FUNDAÇÃO DO ATERRO DE ACESSO A UMA PONTE, NORUEGA

Em 1972, a Norwegian Public Road Administration (NPRA) adotou o uso de EPS como material de aterro leve para aterros de estradas rodoviárias. Um primeiro projeto baseou-se na reconstrução da estrada rodoviária N159, adjacente a uma ponte fundada em solos compressíveis. A fundação da ponte assentava sobre uma primeira camada de 3 m de solo de origem vegetal (turfa) e

10 m de argila mole. Antes da reconstrução da estrada, foram realizados ensaios de monitorização dos assentamentos, tendo-se registado um assentamento máximo de 20 cm.

Como solução optou-se pela substituição de uma camada de 1 m de turfa por blocos de EPS em duas camadas com 0,50 m cada.

Com o intuito de demonstrar os ganhos com a utilização dos blocos de EPS estimaram-se os assentamentos a longo prazo e a redução da carga transmitida pelo aterro (o valor de projeto do peso volúmico dos blocos de EPS utilizado foi de  $0,35 \text{ kN/m}^3$ ) (Quadros 6-4).

**Quadro 6-4 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por EPS**

	<b>Camadas estruturais</b>	<b>Peso volúmico [<math>\text{kN/m}^3</math>]</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Tensão do aterro sobre a fundação [kPa]</b>	<b>Assentamento [m]</b>
<i>Aterro inicial</i>	<i>Turfa</i>	20	3	60	$\pm 0,4$
<i>Aterro com EPS</i>	<i>Bloco de EPS</i>	0,35	1	40	$\pm 0,3$
	<i>Turfa</i>	20	2		

Com base no Quadro 6-4 é possível constatar uma redução de cerca de 17,5 kPa da tensão vertical após substituição da turfa por argila expandida. Assim ao nível da fundação, foi estimado uma redução superior a 30 % da carga transmitida.

O cálculo dos assentamentos previstos a longo prazo demonstrou uma redução de cerca de 24% do assentamento máximo.

#### SUBSTITUIÇÃO DE ATERRO DE ENCONTRO DE PONTE, NORUEGA

Em 1992, iniciou-se a construção da ponte rodoviária de Hjelmungen, na Noruega, com 36 metros de comprimento, apoiada em pilares assentes em sapatas (Frydenlund e Aaboe, 2001). O subsolo da zona da ponte era composto por argilas moles, com espessura aproximada de 10 a 14 metros, e o nível freático situava-se próximo da superfície.

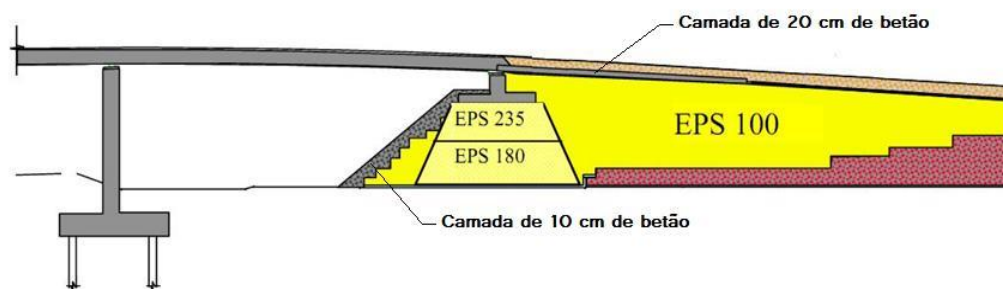
Ao fim de 2 anos após a construção da ponte foram observados assentamentos excessivos da fundação, os quais originaram danos na plataforma da ponte.

Como opção para resolver os problemas de assentamento procedeu-se à substituição dos solos no encontro de ponte por blocos de EPS tipo 100 (blocos de EPS com resistência à compressão de 100 kPa para uma deformação de 10%) e à substituição do solo de apoio das sapatas por blocos de EPS tipo 180 e 235 (Figura 6-11).

No encontro de ponte, sobre os blocos de EPS, foi executado uma camada de betão com espessura de 20 cm de modo a proteger os blocos de forças de atrito horizontais. Os blocos de EPS da zona de fundação do encontro de ponte foram também revestidos com uma camada de 10 cm de betão, como meio de proteção física.

Os trabalhos foram executados em 6 meses.

Antes da remoção dos solos, a ponte foi suportada provisoriamente por uma estrutura de apoio.



**Figura 6-11 – Solução de reparação da Ponte de Hjelmungen**

Com o objetivo de quantificar os ganhos pela utilização do material leve estimou-se a redução da carga do aterro no centro da ponte. No Quadro 6-5, esta representada a redução de carga devido à substituição dos materiais tradicionais pelo EPS.

**Quadro 6-5 – Quantificação dos ganhos pela substituição do aterro existente por EPS**

	<b>Camadas estruturais</b>	<b>Peso volúmico (valor de projeto) [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Área transversal [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Carga do aterro sobre a fundação [kN/m]</b>
Aterro inicial	Material tradicional	20	85	1700
Aterro com EPS	EPS 100	0,20	67	18
	EPS 180	0,23	11	
	EPS 235	0,28	7	

Com base no Quadro 6-5 é possível constatar uma redução da carga do aterro sobre a fundação em cerca de 98%.

### 6.1.3. ESPUMA DE VIDRO

#### FUNDAÇÃO DE ATERRO RODOVIÁRIO, NORUEGA

Em 2001, a norte da cidade de Oslo, na Noruega, a construção da estrada Rv120 obrigou ao atravessamento da zona de Nannestad, local caracterizado pela presença de argilas moles com fracas características mecânicas.

Para minimizar os impactos na fundação, decidiu-se utilizar espuma de vidro na construção do aterro, com cerca de 4m de altura (Frydenlund e Aaboe, 2002).

A espuma de vidro utilizada apresenta um peso volúmico de 1,80 kN/m<sup>3</sup> e foi utilizado um volume total de 3950 m<sup>3</sup> numa camada de 3m de espessura. Antes do depósito do material leve, colocou-se um geotêxtil de separação no solo.

O transporte da espuma de vidro foi realizado por camiões graneleiros, enquanto o espalhamento e a compactação foram executados por uma escavadora de rasto, com uma tensão de



contacto de  $56 \text{ kN/m}^2$ , em camadas de 1m e com 3 passagens. Sobre o material leve foi aplicado um geotêxtil, revestindo o coroamento e taludes do aterro antes da colocação das camadas de constituição da estrada.

De modo a quantificarmos os ganhos pela utilização do material de espuma de vidro face ao material tradicional estimou-se a redução da carga transmitida pelo aterro de espuma de vidro (o valor de projeto do peso volúmico da espuma de vidro utilizado foi de  $3 \text{ kN/m}^3$ ) (Quadro 6-6).

**Quadro 6-6 – Quantificação dos ganhos pela utilização de espuma de vidro face ao material tradicional**

	<b>Peso volúmico <math>[\text{kN/m}^3]</math></b>	<b>Espessura do aterro <math>[\text{m}]</math></b>	<b>Tensão do aterro sobre a fundação <math>[\text{kPa}]</math></b>
<i>Aterro tradicional</i>	18	3	54
<i>Aterro de espuma de vidro</i>	3		9

A utilização do material de espuma de vidro provocou uma redução da tensão do aterro sobre a fundação superior a 80%.

Como anotação, é possível observar que o equipamento utilizado para o espalhamento e o processo de compactação ultrapassou o valor limite da tensão de contacto material/equipamento, sendo que o número de passagens do mesmo foi reduzido, intuindo-se que essa redução seja para compensar a excedência do limite da tensão de contacto. O geotêxtil deveria ser também aplicado sob a espuma de vidro, para que não exista fundição do mesmo com o material base existente.

## 6.2. REDUÇÃO DAS CARGAS VERTICAIS SOBRE ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS

### 6.2.1. POLIESTIRENO EXPANDIDO

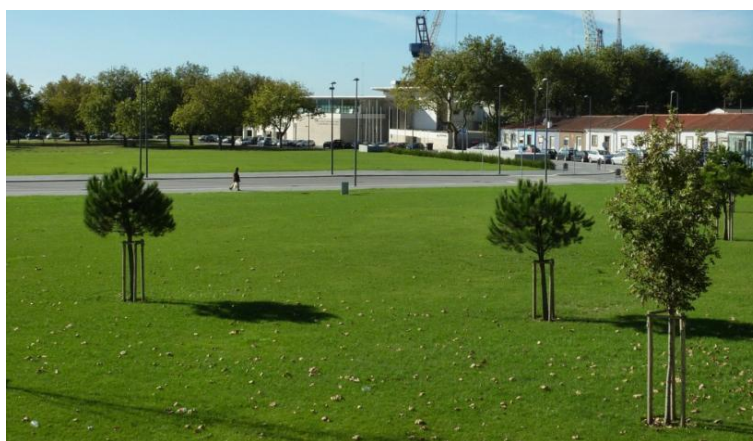
#### REDUÇÃO DE CARGA SOBRE UMA LAJE, PORTUGAL

A nível nacional, existe pouca informação de obras realizadas com blocos de EPS. Em 2010 inaugurou-se a renovação do parque de estacionamento subterrâneo do Campo da Agonia em Viana do Castelo. A renovação do parque tinha como medida a retificação das infiltrações no piso -1.

Como resolução o Projetista optou por substituir o solo em contacto com a laje superior do parque por blocos de EPS. A substituição permitiu impermeabilizar e reduzir as cargas sobre o parque (Figuras 6-12 e 6-13).



**Figura 6-12 – Substituição dos solos superficiais do parque subterrâneo do Campo da Agonia por blocos de EPS, Viana do Castelo (Plastimar, 2011a)**



**Figura 6-13 – Aspeto final do jardim superficial do parque subterrâneo do Campo da Agonia, Viana do Castelo (Olharvianadocastelo, 2011)**

A substituição da camada de solo existente por blocos de EPS permitiu uma redução de cerca de 98% do peso sobre a laje do parque subterrâneo.

### 6.2.2. ESPUMA DE VIDRO

#### CONSTRUÇÃO DE ATERRO TEMPORÁRIO SOBRE TÚNEL, NORUEGA

Em 2002, a norte da cidade de Steinkjer, na Noruega, o prolongamento da estrada E6 na zona de Eggemarka obrigou a construção de um túnel rodoviário com 600 m (Norwegian Public Roads Administration, 2007). O túnel rodoviário apresentava um recobrimento máximo de 25 m, sendo necessária a redução das cargas sobre a galeria do túnel.

Com vista a permitir o tráfego na E6 durante o período de construção, era imprescindível criar uma via alternativa. Para a sua realização era necessária a construção de um aterro provisório com mais de 15 m de altura sobre o túnel (Figura 6-14).



**Figura 6-14 – Modelo de aterro provisório (Watn et al, 2007)**

O aterro foi inicialmente projetado com espuma de vidro, devido ao elevado ângulo de atrito interno, tendo o dono de obra sugerido posteriormente o uso de argila expandida. Foi então decidida a utilização dos dois materiais leves, cerca de 9000 m<sup>3</sup> de argila expandida revestida com geotêxtil de forma atenuar o ângulo de inclinação lateral do aterro e 1000 m<sup>3</sup> de material de espuma de vidro tipo HASOPOR Standart, revestido nos taludes laterais por material rochoso.

Sobre as camadas de material leve executou-se um aterro com materiais tradicionais. O aterro leve foi construído com uma inclinação de 1:1.5 e 1:1 como representado na Figura 6-15 (Watn et al, 2007).

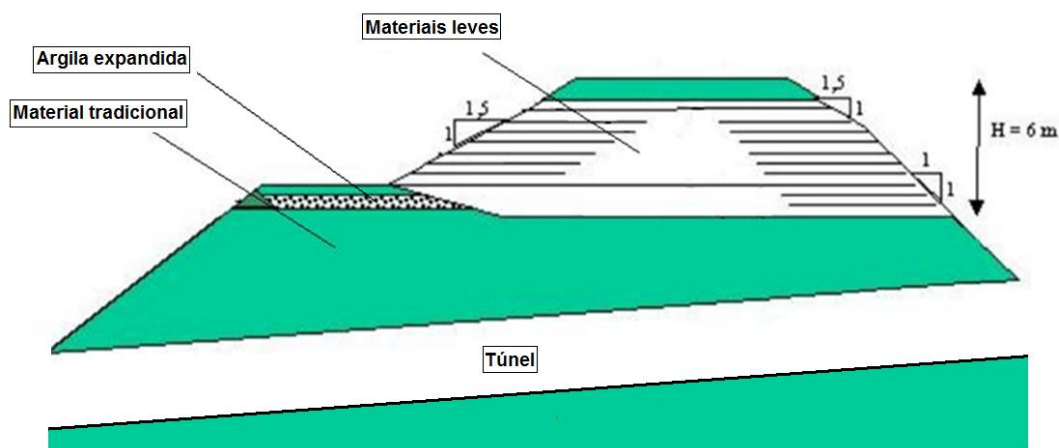


Figura 6-15 – Secção transversal do aterro leve (Norwegian Public Roads Administration, 2007)

O aterro foi executado em camadas de 1,5 m de espessura, compactadas por escavadoras de rastros com uma tensão de contacto de  $40 \text{ kN/m}^2$ . A compactação foi realizada diretamente sobre a espuma de vidro através de 3 passagens sobre cada camada, tendo sido observado uma redução de volume de 25% (Aaobe et al, 2005).

Com base na Figura 6-16 estimou-se a redução da carga instalada sobre o túnel através da utilização da espuma de vidro (o valor de projeto do peso volúmico da espuma de vidro utilizado foi de  $3,5 \text{ kN/m}^3$ ) (Quadro 6-7).

Quadro 6-7 – Quantificação dos ganhos pela utilização de espuma de vidro face ao material tradicional

	Camadas estruturais	Peso volúmico [ $\text{kN/m}^3$ ]	Área transversal [ $\text{m}^2$ ]	Carga do aterro sobre o túnel [ $\text{kN/m}$ ]
Aterro com material tradicional	Solo existente	18	496,1	8929
Aterro com espuma de vidro	Argila expandida	4,13	8,5	6583
	Espuma de vidro tipo "HASOPOR Standard"	3,2	190,7	
	Material tradicional	20	296,9	

A utilização da espuma de vidro permitiu uma redução na carga instalada sobre o túnel de cerca de 27 % para uma substituição de 40% (volume) de solo existente por material de espuma de vidro. A aplicação da espuma de vidro possibilitou o aumento da inclinação do talude devido ao elevado ângulo de atrito interno face ao solo existente.

### 6.3. REDUÇÃO DOS IMPULSOS HORIZONTAIS SOBRE ESTRUTURAS

#### 6.3.1. ARGILA EXPANDIDA

##### REABILITAÇÃO DE UM MURO DE SUPORTE, PORTUGAL

Em 2009, no IC9, no sublanço nó de Carregueiros/Tomar, um muro de suporte exibiu um comportamento deficiente, tendo sido desenvolvido um projeto de reabilitação (Roxo et al, 2010).

O muro foi construído em gabiões com uma altura variável de 4 a 10 m, sendo que o parâmetro exterior apresenta uma inclinação de 6° com a vertical. A estrutura era fundada sobre uma formação geológica heterogénea, de carácter margo-argiloso e greso-calcário. Em certas zonas foi também detetada a presença de depósitos de natureza aluvio-coluvionar.

No mês de Fevereiro de 2009, com o início do período de maior pluviosidade, registou-se uma evolução rápida nas deformações do muro, com o aparecimento de “barrigas”, fissuras e deslocamentos verticais e horizontais diários de aproximadamente 10mm (Figuras 6-16 e 6-17), quantificados através da colocação de alvos topográficos.

Devido ao risco de colapso e à proximidade deste muro às habitações, o dono de obra determinou como solução de estabilização a remoção parcial do aterro suportado pelo muro.



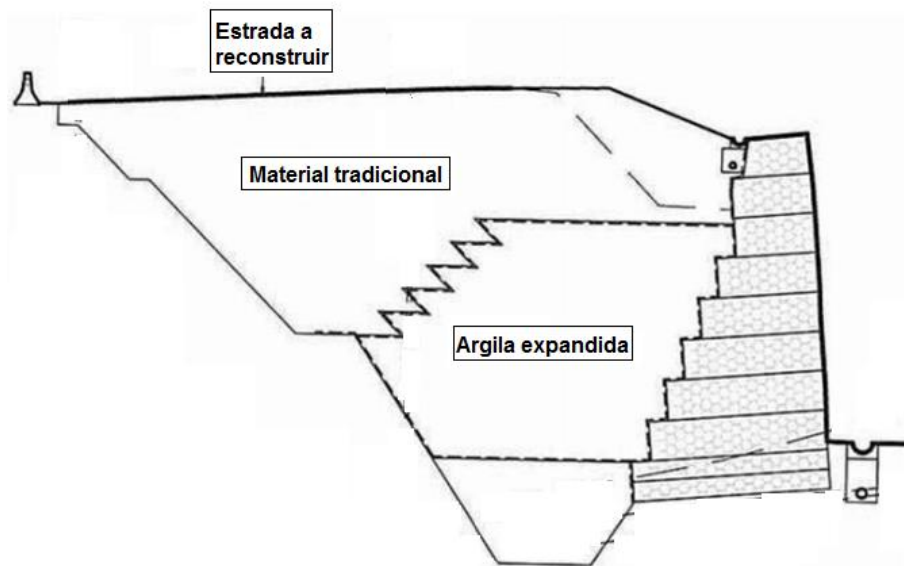
**Figura 6-16 – Anomalias: fissuração do pavimento e inclinação dos postes de iluminação (Roxo et al, 2010)**





**Figura 6-17 – Anomalia: deformação das gaiolas constituintes do muro (Roxo et al, 2010)**

A solução final acabou por ser a substituição do solo do tardo por material de argila expandida. Deste modo foi possível garantir uma redução do impulso de terras atuantes no tardo do muro e diminuir a tensão atuante ao nível da fundação. A substituição de solos permitiu ainda minimizar os assentamentos diferidos no tempo, devido à consolidação dos depósitos aluvio-coluvionares (Figura 6-18).



**Figura 6-18 – Corte da solução de estabilização adotada (Roxo et al, 2010)**

O aterro com material leve foi executado em camadas de espessura máxima de 0.60 m e compactada com equipamento de lagartas utilizado no seu espalhamento (Figura 6-19).



**Figura 6-19 – Aspeto do Enchimento com Geoleca (Roxo et al, 2010)**

Com o objetivo de quantificar os ganhos pela utilização da argila expandida face ao material de aterro tradicional utilizado na obra, calculou-se o impulso de terras atuante no tardo do muro para ambas as situações (o valor de projeto do peso volúmico da argila expandida utilizado foi de 4,125 kN/m<sup>3</sup>) (Quadro 6-8).

Para o cálculo do impulso de terras atuantes no tardo do muro foi utilizada a teoria de Rankine.

**Quadro 6-8 – Quantificação dos ganhos pela utilização de argila expandida face ao material tradicional**

	<b>Peso volúmico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Ângulo de atrito [°]</b>	<b>Impulso ativo<sup>4</sup> [kN/m]</b>
<i>Aterro de argila expandida</i>	4,13	35	35
<i>Aterro areia/cascalho</i>	20	35	173

O cálculo do impulso atuante mostra uma redução de cerca de 80% do impulso horizontal com a utilização da argila expandida face ao material de aterro utilizado inicialmente na obra.

#### CONSTRUÇÃO DE MUROS DE ALA EM ATERRO REFORÇADO, INGLATERRA

O Grand Union Canal construído em 1805, no Sudoeste de Inglaterra, faz parte do sistema de canais Britânicos, ligando Birmingham a Londres, tendo já sido o canal navegável mais movimentado do país (Jenner et al, 2009).

<sup>4</sup> Para uma altura de muro de 8m

O canal, atualmente, atravessa o recente aglomerado urbano de Milton Keynes, em North Buckinghamshire. Em 2005, houve a necessidade de construir uma ponte pedonal sobre o canal, na zona de Water Eaton, destinada a facultar o acesso dos residentes desta zona à extensa área verde existente na margem oposta.

A zona de construção da ponte pedonal apresentava alguns constrangimentos, uma vez que os solos de fundação, em ambas as margens, exibiam uma fraca resistência mecânica não permitindo a execução de sapatas para a fundação dos encontros e muros de ala.

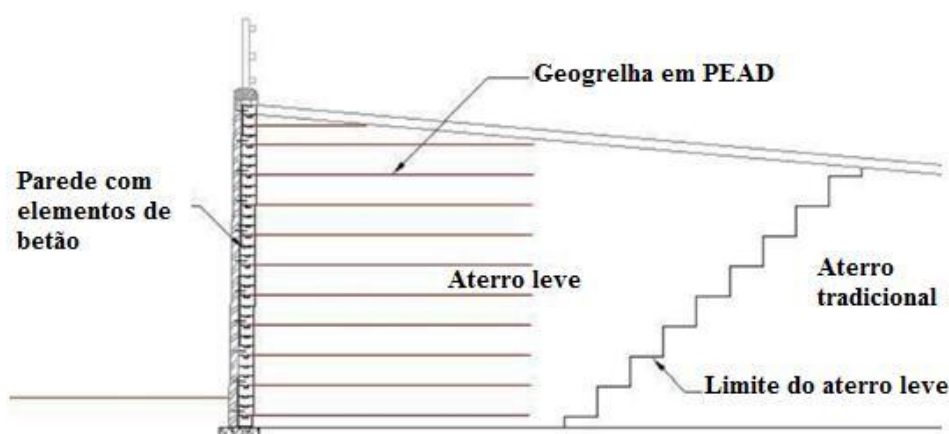
Numa fase inicial dos estudos foram analisados duas possíveis soluções.

A primeira era a substituição dos solos, tendo sido rejeitada dadas as restrições no acesso do equipamento à margem onde se situa a zona verde, uma vez que seria necessário movimentar um elevado volume de solo em veículos de pequenas dimensões. A segunda era a execução de fundações indiretas para os encontros e muros de ala, também abandonada devido ao elevado custo.

Dado o insucesso das soluções anteriores, o Projetista debruçou-se então sobre soluções que exercessem tensões mais moderadas sobre os solos de fundação existentes. Desta forma, foi sugerido a construção de uma estrutura de suporte em associação com materiais leves.

A combinação de técnicas de reforço de aterros e argila expandida permitiu que os muros de ala fossem construídos sem recurso a fundações indiretas, reduzindo o custo. Outra mais-valia consistiu na possibilidade de colocação da argila expandida por bombagem, com meios pneumáticos, desde a margem oposta à da zona verde, resolvendo a questão da restrição existente à circulação de veículos pesados.

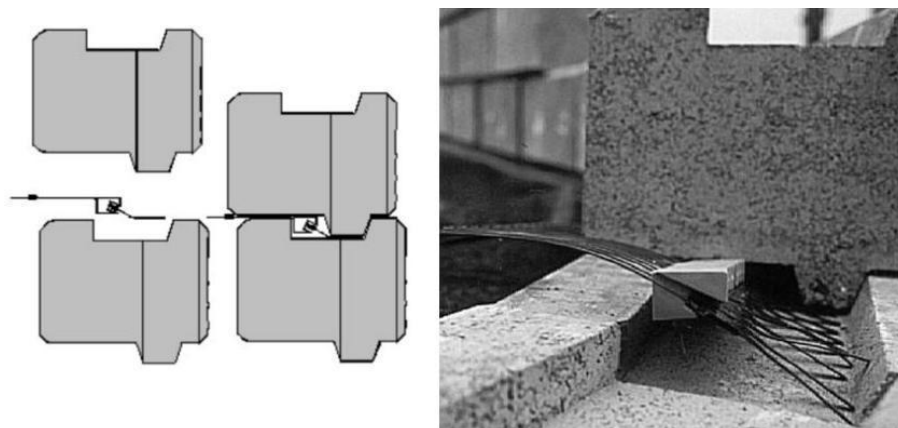
Quanto à estrutura de suporte decidiu-se pela utilização do sistema TW1 Link, composto por elementos em betão que permitem a construção de muros segmentados e possibilitam a incorporação de espaçadores em aço inox durante a execução da obra. Assim, um pano de alvenaria em tijolo cerâmico tradicional poderia ser executado subsequentemente, ficando os espaçadores embebidos na argamassa de assentamento da alvenaria (Figura 6-20).



**Figura 6-20 – Corte tipo da solução adotada**

As geogrelhas utilizadas são em PEAD (Polietileno de alta densidade), ligadas aos blocos de betão por um conector em material polimérico (Figura 6-21).





**Figura 6-21 – Método de conexão das geogrelhas aos blocos de betão (Tensar International Limited, 2008)**

A construção foi iniciada com a execução de uma sapata contínua em betão armado, de largura elevada atendendo à reduzida resistência do solo sobre a qual a estrutura foi erguida.

Para melhor confinar a argila expandida, foi executada de forma simultânea o paramento segmentado e o aterro convencional na zona traseira do aterro leve, evitando que o material se espalhasse para fora dos limites da obra.

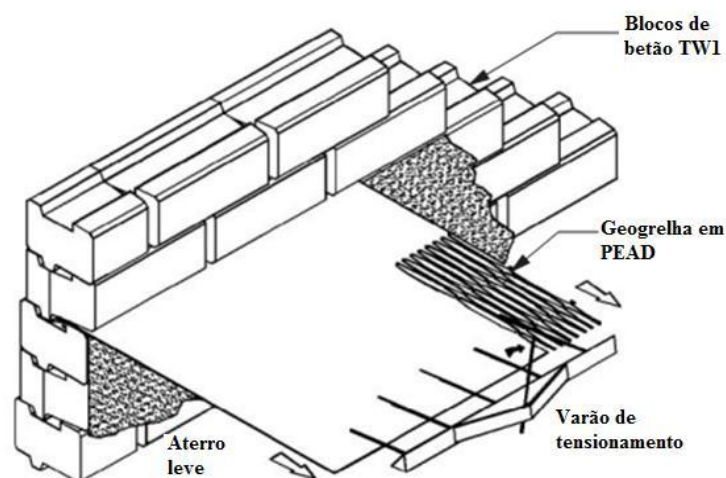
A colocação do material leve foi realizada através de camiões no lado da margem acessível do canal, bombeado por meios pneumáticos para a margem oposta. A própria operação de bombagem originou uma ligeira compactação, tendo sido complementada com uma placa compactadora em toda a extensão do aterro leve (Figura 6-22).



**Figura 6-22 – Operação de bombagem do material leve desde da margem oposta (Jenner et al, 2009)**

As geogrelhas em PEAD foram sobrepostas com um espaçamento vertical com cerca de 450mm, 3 em 3 fiadas de blocos, e ancoradas aos blocos através de um conector. Assegurada a ligação entre as geogrelhas e o paramento segmentado, foi necessário eliminar as folgas na

geogrelha e na própria conexão, através do tensionamento com o recurso a um perfil de aço e varões cravados no aterro (Figura 6-23).



**Figura 6-23 – Esquema da estrutura de suporte com material leve**

Os espaçadores em aço inox foram colocados no paramento segmentado com o objetivo de solidarizar o pano de tijolo tradicional, resultando de um processo simples de colocação durante a construção. Estes foram instalados numa ranhura vertical dos blocos e ajustados para ficar ao nível da camada de argamassa de assentamento dos tijolos tradicionais.

Uma vez atingida a altura final, completou-se o pano de tijolo de forma a ajustá-lo ao arco da ponte.

A argila expandida apresentou, nesta obra, uma solução para a redução das tensões verticais atuantes no solo de fundação, reduzindo o peso do aterro em cerca de 80% face ao material tradicional. O material leve permitiu também a redução dos impulsos horizontais sobre a estrutura de suporte.

### 6.3.2. POLIESTIRENO EXPANDIDO

#### ATERRO DE ENCONTRO DE VIADUTO, BRASIL

Em 2001, no âmbito da rede rodoviária da Várzea Paulista, no Rio de Janeiro, foi construído um viaduto (Isocret, 2011).

Para a construção do aterro de encontro do viaduto, o Projetista optou pela utilização de blocos de EPS em substituição ao aterro tradicional. Os blocos de EPS foram colocados com juntas intercaladas até alcançarem a altura pretendida. De seguida, como meio de proteção físico e ao fogo, os blocos superficiais foram revestidos com uma camada de areia com espessura de 10 cm e um geotêxtil (Figura 6-24).



**Figura 6-24 – Aterro de encontro de viaduto com EPS, Rio Janeiro, Brasil (Plastimar, 2011c)**

A opção de substituição do aterro de encontro de material tradicional por blocos de EPS permitiu reduzir a carga vertical sobre o solo em 99%, utilizando 80 toneladas de blocos de EPS em vez de 13 000 toneladas de aterro tradicional, acrescentando ainda o facto de que, com a utilização do EPS, o impulso ativo horizontal sobre o encontro é nulo, não sendo por isso contabilizado no dimensionamento dessa estrutura.

Como anotação, é possível observar que a espessura de areia utilizada no revestimento dos blocos é inferior ao aconselhado, podendo surgir problemas que possam afetar fisicamente os blocos, através do impacto de algum equipamento ou material sobre o EPS, ou em futuro através da existência de vegetação.

## 6.4. MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TALUDES

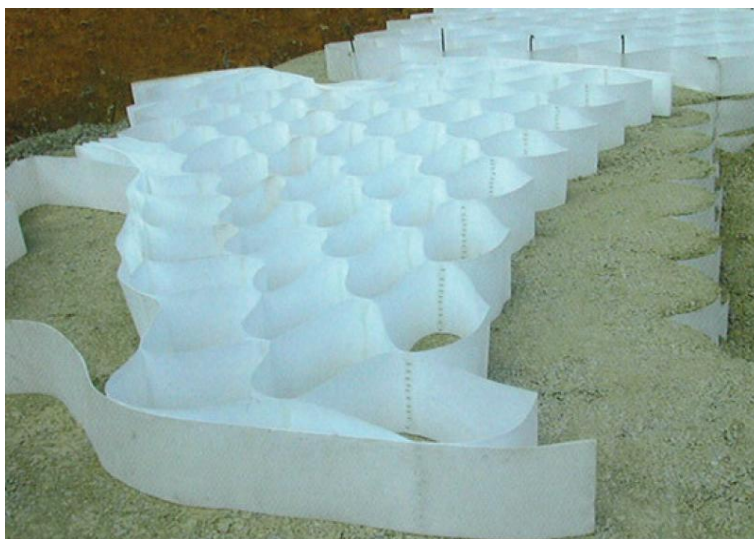
### 6.4.1. ARGILA EXPANDIDA

#### ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE DE ATERRO, FRANÇA

Em 2007, na Autoestrada A31 no nordeste de França, a realização de uma nova saída para Jouy-aux-Arches obrigou à execução de um aterro de alargamento com uma largura de 4 m da autoestrada existente (Fourré et al, 2009).

Como solução inicial foi sugerida a execução de uma estrutura de suporte tradicional junto à crista do aterro. Tal solução tornou-se inviável na medida que existiria uma elevada sobrecarga no aterro existente, implicando a redução do fator de segurança ao escorregamento. Foi então proposta uma solução, combinando a utilização da argila expandida com um sistema de reforço de solos, M3S.

O sistema M3S é composto por elementos alveolares obtidos pela união de bandas de geotêxtil, fácil de instalar e com boas características permeáveis (Figura 6-25).

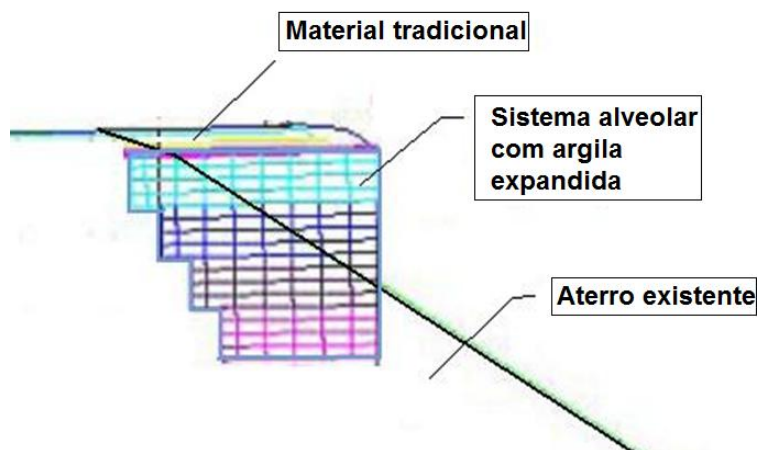


**Figura 6-25 – Geossintéticos M3S (Sol Solution - Géotechnique Reseaux, 2011)**

A estrutura obtida através do enchimento dos alvéolos de M3S com argila expandida permite características mecânicas superiores às do enchimento isolado. O geossintético confere ao conjunto um aumento de resistência ao corte e adiciona resistência à tração. Este sistema permite a execução de paramentos fortemente inclinados ou mesmo verticais (Sol Solution - Géotechnique Reseaux, 2011).

Para a utilização conjunta do material leve com o geotêxtil alveolar, a Maxit forneceu, após diversos estudos, argila expandida com uma granulometria composta com 20% da fração 2-4 mm, 40% da fração 6-12 mm e 40% da 10-22 mm, resultando um peso volúmico inferior a  $4 \text{ kN/m}^3$  após instalação.

A utilização de argila expandida implicou a execução de uma geometria, em que o aterro reforçado no topo apresentou uma largura superior à largura da base, permitindo reduzir significativamente o impulso atuante no tardo da obra (Figura 6-26).



**Figura 6-26 – Seção do aterro leve associado ao sistema alveolar de geotêxtil**

A altura total do aterro leve variou entre 1 e 4 m, ao longo de um comprimento de 250 m. As camadas de geotêxtil alveolar foram ligadas entre si por varões de aço de 4,5 mm de diâmetro.

A argila expandida fornecida em “bigbags” de  $3 \text{ m}^3$  permitiu uma rápida colocação em obra, com o rendimento de cerca de 80 unidades colocadas e compactadas por dia.

De modo a assegurar a eficácia das soluções executadas, foi imposto um acompanhamento sistemático na realização da obra, através de ensaios penetrométricos Panda e ensaios de referência em laboratório (Figura 6-27).

Ambos os ensaios permitiram estabelecer uma relação entre a densidade do material seco aplicado e a resistência de ponta do penetrômetro, podendo assim ser estimada e controlada a densidade a partir dos ensaios “in-situ”.





**Figura 6-27 – Ensaio penetrométrico Panda (Fourré et al, 2009)**

O ensaio Panda obteve sempre valores de resistência de ponta superiores a 1,5 MPa, sendo típicos valores de 2 MPa, a que corresponde uma densidade relativa de 100%.

#### 6.4.2. ESPUMA DE VIDRO

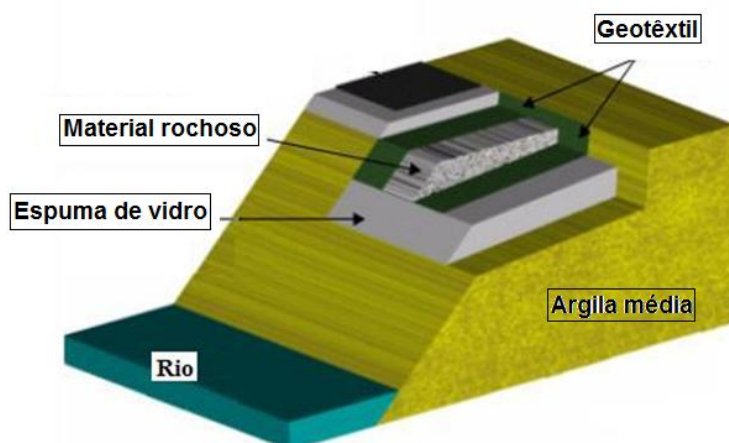
##### SUBSTITUIÇÃO DE TALUDE NUMA VIA RODOVIÁRIA, NORUEGA

Em 1999, na estrada RV 17, ao longo da região montanhosa de Skogaelva, na Noruega, o talude da estrada colapsou, dando origem a um deslizamento do solo devido à erosão do leito fluvial (Frydenlund e Aaboe, 2002; Norwegian Public Roads Administration, 2007).

A zona do talude na qual a via rodoviária assentava era composta por argilas de resistência média.

Para a reconstrução da via rodoviária foi necessário implementar rapidamente uma solução de estabilização que consistia na substituição do solo existente, de elevada deformabilidade, por um material leve, tendo-se optado pela espuma de vidro (Figura 6-28).

Para melhorar as condições do talude face ao deslizamento foi colocada inicialmente uma camada de material rochoso e só depois o enchimento com espuma de vidro.



**Figura 6-28 – Esquema de solução através da substituição do aterro existente por espuma de vidro (Norwegian Public Roads Administration, 2007)**

O material leve foi entregue e colocado na área de aterro por caminhão, tendo sido espalhado por uma escavadora de rastros e compactado em camadas de 0.5 m. A compactação foi realizada através de 4 passagens com a escavadora de rastros, o que permitiu obter uma redução da espessura de cada camada da ordem de 40%. A redução de volume ultrapassou o limite aconselhado, podendo acarretar aspectos negativos na execução da obra.

Na parte inferior e superior do material leve foi colocada uma membrana de geotêxtil, de forma a evitar a mistura deste material com o solo e o material rochoso (Figura 6-29).



**Figura 6-29 – Descarga e espalhamento da espuma de vidro (Norwegian Public Roads Administration, 2007)**

Para a realização do aterro leve utilizaram-se 300 m<sup>3</sup> de espuma de vidro, tendo sido colocado no prazo de 4 horas. A composição e a espessura do pavimento rodoviário aplicado sobre o material leve foram iguais ao pavimento sobre o material tradicional.

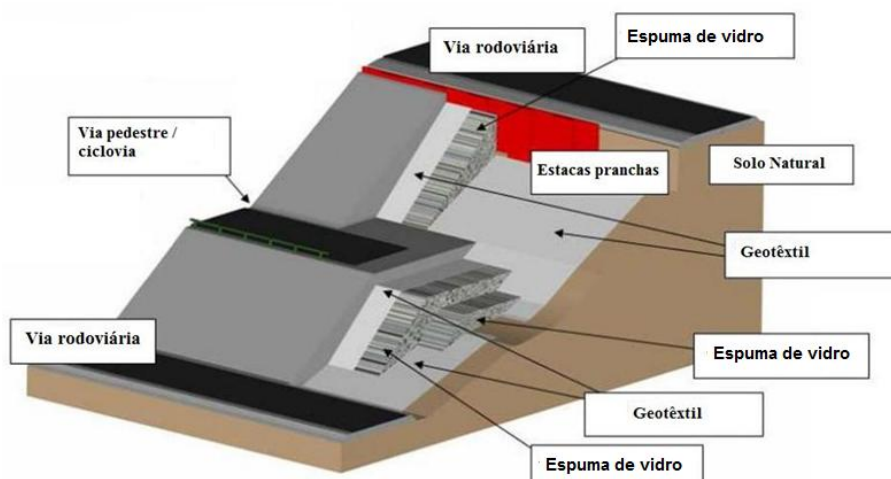
Desde então, as observações realizadas não indicam a presença de qualquer anomalia quer no pavimento quer no talude.

### CONSTRUÇÃO DE ATERRO PARA VIA PEDESTRE E CICLOVIA, NORUEGA

Em 2001, na cidade de Oslo, foi construída uma ciclovia e uma via pedestre, ambas sobre um talude (Frydenlund e Aaboe, 2002).

Este talude exibia sinais de instabilização, não permitindo a colocação de novas cargas. Assim, foi necessário conceber uma solução de estabilização de modo a evitar o seu colapso face à construção das duas vias.

Face ao estudo de estabilidade realizado, foi decidido reduzir as cargas aplicadas no talude através da substituição do solo existente por espuma de vidro, num volume total de 1200 m<sup>3</sup> (Figura 6-30).



**Figura 6-30 – Esquema de solução através da substituição do solo existente por espuma de vidro (Norwegian Public Roads Administration, 2007)**

Com o objetivo de separar a espuma de vidro do solo e das camadas estruturais do pavimento, colocou-se uma membrana de geotêxtil.

Os processos de espalhamento e compactação foram realizados por uma escavadora de rastros, em camadas com espessura até 1 m (Figura 6-31). Quanto aos taludes, a compactação foi executada com o balde da escavadora. A camada superior do material leve, com espessura inferior a 1 m, foi compactada apenas quando o processo de compactação do pavimento da via foi executado, de modo a reduzir o esmagamento. A camada de pavimento da via não ultrapassou os 20 cm de espessura.





Figura 6-31 – Espalhamento da espuma de vidro (Frydenlund e Aaboe, 2002)

Tendo por base o perfil transversal do talude apresentado na Figura 6-32 estimou-se a redução da carga aplicada no terreno (o valor de projeto do peso volúmico da espuma de vidro utilizado foi de  $3,5 \text{ kN/m}^3$ ) (Quadro 6-9).

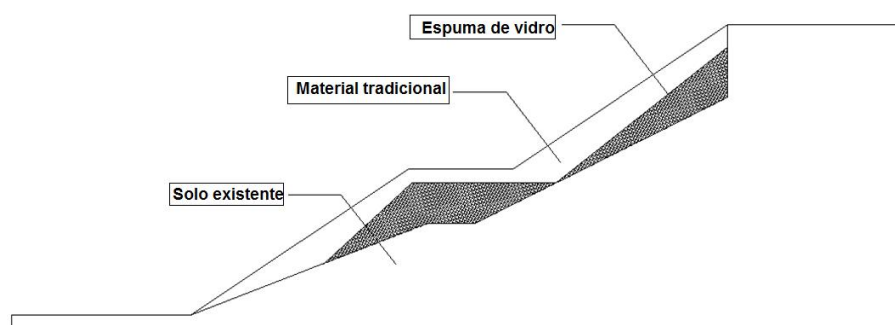


Figura 6-32 – Perfil transversal da solução executada

Quadro 6-9 – Quantificação dos ganhos pela substituição parcial do aterro existente por espuma de vidro

	<b>Camadas estruturais</b>	<b>Peso volúmico [<math>\text{kN/m}^3</math>]</b>	<b>Área transversal [<math>\text{m}^2</math>]</b>	<b>Carga do aterro sobre a fundação [<math>\text{kN/m}</math>]</b>
<i>Aterro com material tradicional</i>	Solo existente	18	60,48	1088
<i>Aterro com espuma de vidro</i>	Solo existente	18	41,98	920
	Espuma de vidro tipo "HASOPOR Standard"	3,5	12,18	
	Material tradicional	20	6,32	

A utilização da espuma de vidro permitiu uma redução na carga aplicada em cerca de 15 % para uma substituição de solo existente de 20% (volume). A aplicação, da mesma, possibilitou também o aumento da inclinação do talude devido ao elevado ângulo de atrito interno face ao solo existente.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente dissertação foi abordada a utilização de materiais leves na resolução de problemas no âmbito da Geotecnia.

A primeira parte do trabalho, correspondendo aos três primeiros capítulos, teve como objetivo introduzir o tema da realização de aterros com materiais leves, tendo sido escolhidos para estudo a argila expandida, o poliestireno expandido e a espuma de vidro. Nesta fase enquadraram-se, genericamente, as aplicações destes materiais leves no ramo da Geotecnia, tal como o seu processo de fabrico.

Nos capítulos seguintes, ingressou-se no objetivo principal da dissertação, que visa a caracterização dos materiais leves escolhidos com base na informação existente e o seu possível uso em obras geotécnicas habitualmente realizadas com materiais tradicionais.

É de referir que atualmente existe ainda pouca informação sobre os valores dos parâmetros que condicionam o seu comportamento mecânico. Os valores aqui compilados foram obtidos da análise dos dados apresentados pelas marcas de produção e os poucos estudos laboratoriais já realizados, tendo sido possível balizar as características mecânicas mais relevantes no domínio da Geotecnia. Deste conjunto de características mecânicas são de realçar a reduzida deformabilidade e o baixo peso volúmico.

Para o estudo em questão reuniu-se também um conjunto de obras que, apesar de serem realizadas frequentemente com materiais tradicionais, foram, nos casos apresentados, realizadas com recurso a materiais leves, alcançando bons resultados com benefícios inerentes face aos materiais tradicionais. Estas obras representam um leque bastante vasto de aplicações, algumas das quais revelando uma posição algo arrojada para a prática geotécnica nacional. São os casos, por exemplo, das utilizações de argila expandida em zonas de bloco técnico nos acessos a pontes ou em aterros para linhas de alta velocidade.

A análise das obras e da informação existente permitiu também resumir alguns aspetos importantes da aplicação, em obra, dos materiais leves em estudo, tais como, o transporte, a colocação, a compactação e alguns pormenores construtivos.

Como linhas de desenvolvimento futuro para o estudo deste tipo de aplicações de materiais leves destacam-se os trabalhos ainda necessários para a caracterização laboratorial do seu comportamento. Neste domínio, são de realçar os trabalhos já realizados pelo LNEC e IST relativamente à argila expandida.

Uma outra área relevante, e ainda muito pouco estudada, é a associada ao desenvolvimento de metodologias que permitam controlar a colocação em obra destes materiais e identificar as suas propriedades após essa colocação. Neste domínio, são muito poucos os exemplos de ensaios “in-situ” disponíveis que permitam atingir esses objetivos.



## 8. BIBLIOGRAFIA

Aaboe, R. e Frydenlund, E. "40 Years of Experience the Use of EPS Geofoam Blocks in Road Constrution." *4º Conference EPS 2011 Norway*. Lilestrom, 2011.

Aaboe, R. e Oiseth, E. "Foamed Glass - Alternative Lightweight and Insuating Material." *Research project by Norwegian Public Road Administration*. Norway, 2009.

Aaobe, R., Oiesth, E. e Hagglund, J. "Granulated Foamed Glass for Civil Engineering Applications." *Workshop- Recycled materials in road and airfield pavements*. Oslo, 2005.

ACEPE. "Associação Industrial de Poliestireno Expandido." *www.acepe.pt*. 2011. (acedido em 5 de janeiro de 2011).

Al-Bahar, S. e Bogahawatta, V. T. L. "Development of Lightweight Aggregates in Kuwait." *The Arabian Journal for Science and Engineering*. Vols. 31, Nº 1C. 2006.

Alltech. *www.alltech.eng.br*. 2011. (acedido em 2 de fevereiro de 2011).

Almeida, P. "Influência da humidade relativa no comportamento mecânico da leca." *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST*. Lisboa, 2009.

Argex. "Caracterização técnica - Argex Geotecnia." *www.Argex.pt*. 2011a. (acedido em 2 de fevereiro de 2011).

Argex. "Ficha Técnica - Argex Geotecnia." *www.Argex.pt*. 2011b. (acedido em 3 de março de 2011).

Argex. *www.Argex.pt*. 2011c. (acedido em 1 de fevereiro de 2011).

Arnstein, W., Oiseth, E., Johanson, M., Forsman, J., Gustavson, H. e Hagnestall, L. "LWAgeolight." *Internordic Research and Development Project*. Norway, 2002.

Arrelano, D., Stark, T., Horvath, J. e Leshchinnsky, D. "EPS-block Geofoam in Slope Stabilization and Repair." *4º Conference EPS 2011*. Norway, 2011.

ATLASEPS. *http.atlaseps.com*. 2011. (acedido em 2 de março de 2011).

Bartlet, S., Negussey, D., Farnsworth, C. e Stuedlein, A. "Construction and Long-term Performace of Transportation." *4º Conference EPS 2011*. Norway, 2011.

BASF. "Styropor- Rigid Styropor foam as a Lightweight Constrution Material for Highway Foundations." *Technical information*. 2010.

Brito, J. M., Santos, J., Nunes, A., Tavares, G., Cruz, F. e Lourenço, J. "Soluções de tratamento do terreno de fundação dos acessos à plataforma logística de Lisboa Norte." *12º Congresso Nacional de Geotecnia - Contribuições Recentes para o Projecto, a Construção, a Exploração e a Reabilitação*. Guimarães, 2010.

Caldeira, L. "Relatório Técnico de caracterização do agregado de argila expandida." Lisboa: LNEC, 2003.

Caldeira, L., Maranha das Neves, E. e Saraiva, P. "Caracterização física e mecânica da Geoleca para aplicações em Geotecnia." *2º Seminário Geoleca*. Lisboa: LNEC, 2011.

Caldeira, L., Maranha das Neves, E. e Cardoso, R. "Estudos fundamentais e aplicados sobre agregados leves de argila expandida.Uma abordagem Geotécnica." 2009.

Cemex. "Cemex Mortar- Educational guide to aggregates." <http://www.cemex.co.uk/re/pdf/lt-aggregates.pdf>. 2011. (acedido em 3 de junho de 2011).

Clean Washington Center. "Typical Geotechnical Parameters of Glass Aggregate." *Best Practices in Glass Recycling*. Seattle, 2002.

Construpor. "EPS - Isopor para estradas." [www.construpor.com](http://www.construpor.com). 2005. (acedido em 8 de fevereiro de 2011).

Coutinho, J. S. "Agregados para argamassas e betão." *Materiais de construção I*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.

Di Prisco, C. "Applicazioni geotecniche e caratterizzazione meccanica dell'argilla espansa leca." *Laterlite*. Itália: srl, 2007.

Duskov, M. "Materials Research on EPS 20 and EPS 15 Under Representative Conditions in Pavement Structures." *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 15, 1997.

Elragi, A. F. "Selected engineering properties and applications of EPS geofoam." *Dissertation in Civil Engineering on State University of New York College of Environmental Science and Forestry*. New York, 2000.

EN 1097-3, European Committee for Standardization (CEN)-. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of loose bulk density and voids. Brussels. setembro de 1998.

EN 1097-6, European Committee for Standardization (CEN). Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of particle density and water absorption. Brussels. novembro de 2000.

EN 13055-1, European Committee for Standardization (CEN)-. Lightweight aggregates - Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout. Brussels. julho de 2002.

EN 13055-2, European Committee for Standardization (CEN)-. Light weight aggregates - Part 2: Light weight aggregates for bituminous mixtures and surface treatments and for unbound and bound application. Brussels. julho de 2004.

EN 933-1, European Committee for Standardization (CEN)-. Tests for geometrical properties of aggregates- Part 1: Determination of particle size distribution-Sieving method. Brussels. julho de 2000.

European Manufacturers of Expanded Polystyrene. [www.eumeps.org](http://www.eumeps.org). EUMEPS-European Association of EPS. 2010. (acedido em 10 de dezembro de 2010).

Eriksson, L. e Trank, R. "Properties of Expanded Polystyrene, Laboratory Experiments", *Swedish Geotechnical Institute*, Sweden, 1991.

Federal Highway Administration. "EPS Geofoam: Demonstrating a Lightweight Soil Alternative." Washington: *Focus Newsletter*, nº 06-029, 2006.

Foam-Control. [www.geofoam.com](http://www.geofoam.com). 2011. (acedido em 5 de abril de 2011).

Foamglas. "Main physical properties of Foamglas HLB cellular glass insulation ." *Foamglas HLB Cellular Glass Insulation - Product Data Sheet*. Pittsburgh, 2011.

Fourré, N., Raccana, N. e Sylvestre, L. "Execução de um aterro leve reforçado no alargamento da auto-estrada A31." *Seminário GeoLeca – Utilização de Agregados Leves Leca® em Geotecnia*. Lisboa, 2009.

Frydenlund, E. e Aaboe, R. "Foamglass- A New Vision in Road Construction." *Research Projects by SINTEF*. Norway, 2003.

Frydenlund, E. e Aaboe, R. "Long term performance and durability of EPS as a lightweight filling material." *3ª Conference International EPS Geofoam 2001*. Salt Lake City, 2001.

Frydenlund, E. e Aaboe, R. "Use of waste materials for lightweight fills." *International Workshop on Lightweight geomaterials*. Tokyo, 2002.

Geofoam Research Center. [www.geofoam.syr.edu](http://www.geofoam.syr.edu). 2011. (acedido em 5 de março de 2011).

Georgia Tech Scholl of Civil & Environmental Engineering. "Cone Penetration Test." <http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/Research/devices/cpt.htm>. 2011. (acedido em 2 de fevereiro de 2011).

Guedes, S. B. "Estudo da viabilidade técnica do cone de penetração dinâmica, do cone de penetração estática e do penetrômetro panda no dimensionamento de pavimentos urbanos." *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, UFCG*. Cambina grande-Paraíba, 2008.

Harley, J. "A UK market survey for foam glass." *Research and Development Final Report*. Banbury, 2003.

Hasopor. <http://www.hasopor.com/>. 2011. (acedido em 15 de janeiro de 2011).

Horvath, J. "Geofoam Geosynthetic" *Scarsdale: Horvath Engineering*, New York, 1995.

Insulfoam. "Technical Bulletin by EPSMolders - Insulfoam GF." Baltimore, 2006.

Isocret. [www.isocret.com.br](http://www.isocret.com.br). 2011. (acedido em 10 de fevereiro de 2011).

IST. "Ensaio Laboratoriais de Caracterização do Agregado Leve LECA." Lisboa, 2002.

Jenner, G., Wills, P., Karri, S. e Blundell, L. "Muros de ala em aterro reforçado, utilizando como material de aterro agregados leves de argila expandida." *Seminário GeoLeca – Utilização de Agregados Leves Leca em Geotecnia*. Lisboa, 2009.

LGA Technological Center. "Ensaio geotécnicos: Argex- Argila expandida." *Laboratori General d'Assaigs i Investigacions*. Barcelona, 2011.

Lorprayoon, C. e Rattanacha, S. "Korat Clays as Raw Materials for lightweight aggregates." *ScienceAsia* Nº 31. Thailand, 2005.

Maccarini, M. e Aguiar de Sá, A. "O que há de novo - O EPS em aterro de encontro de viaduto sobre solos moles." *Fundações & Obras Geotécnicas*. Ano 1, Nº 7, págs. 58-64, 2011.



Maxit Group / Tensar. "Soil reinforced retaining walls." *Seminário GeoLeca- Utilização de Agregados Leves Leca em Geotecnia*. Lisboa, 2009.

Maxit Group. "Catálogo Geoleca- Soluções geotécnicas leves." 2010.

Maxit Group. "Catálogo: The Quick line - Railway from Mantsala to Lahti, Finland." [http://issuu.com/mexcasdnbhd/docs/refproj\\_rail\\_embankment\\_01-mantsala](http://issuu.com/mexcasdnbhd/docs/refproj_rail_embankment_01-mantsala). 2004. (acedido em 15 de janeiro de 2011).

Maxit Group. *GeoLeca- Enchimento Leve Isolante para uma vasta gama de aplicações da Construção Civil e Obras Publicas "CD-ROM"*. 2011.

Miki, G. "Ten Year History of EPS Method Japan and its Future Challenges ." *Proccedings of International Symposium on EPS Construction Method*. Japan, 1996.

Misapor. "Misapor 10/50." *Technical specification*. Dormagen, 2011a.

Misapor. "Misapor 10/75." *Technical specification*. Dormagen, 2011b.

Misapor. [www.misapor.com](http://www.misapor.com). 2011c. (acedido em 2 de janeiro de 2011).

Moreira, D., Leite, R., Pinto, P. L., Pais, R. e Matos, A. C. "Utilização de GeoLeca na Reabilitação de um encontro da ponte sobre o Rio Boco." *Seminário GeoLeca – Utilização de Agregados Leves Leca em Geotecnia*. Lisboa, 2009.

Negussey, D. "Elastics parameters." *4º Conference EPS 2011 Norway*. Lilestrom, 2011.

Norwegian Building Research Institute. "Hasopor." *European Technical Approval Nº ETA-05/0187*. Oslo, 2005.

Norwegian Public Roads Administration. "Reutilização de resíduos de vidro por espuma de vidro granulado na construção de estradas." *Relatório Tecnológico Nº2445*. Oslo, 2007.

Olharvianadocastelo. <http://olharvianadocastelo.blogspot.com>. 2011. (acedido em 03 de março de 2011).

Pinto, A., Tomásio, R., Neto, R., Ferrão, A. e Aguiar, O. "Soluções de recalçamento de fundações e pavimentos de edifícios industriais no local da antiga Trefilaria-Sacavém." *12º Congresso Nacional de Geotecnia - Caso de obra*. Guimarães, 2010.

Plastimar. "Algumas obras de geofoam realizadas em Portugal "CD-ROM"." 2011a.

Plastimar. "Código de utilização de EPS "CD-ROM"." 2011b.

Plastimar. "Exemplo de projectos e obras internacionais "CD-ROM"." 2011c.

Plastimar. *www.plastimar.pt*. 2011d. (acedido em 01 de março de 2011).

Pokorny, A., Vicenzy, J. e Bergmann, C. P. "Produção e caracterização de espumas vítreas a partir de vidro sodo-cálcio e calcário dolomítico como agente espumante." *17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Brasil, 2006.

Reis, C. A. "A geoleca enquanto material para aterros leves: Fabrico e enquadramento normativo." *2º Seminário GeoLeca*. Lisboa, 2011a.

Reis, C. A. "Alguns exemplos de obras envolvendo aterros executados com Agregados Leves Leca." *Publi-reportagem 3*. 2010.

Reis, C. A. "Aterros com agregados leve LECA: Aspectos particulares da sua execução." *Publi-Reportagem 2*. 2009.

Reis, C. A. "Execução de um aterro leve." *Caraterísticas construtivas*. 2011b.

Reis, C. A. e Ramos, R. M. "A geoleca e solução aterro leve." *Seminário Geoleca – Utilização de Agregados Leves Leca em Geotecnia*. Lisboa, 2009a.

Reis, C. A. e Ramos, R. M. "Utilização como Aterro leve." *Publi-reportagem Geoleca CM31*. 2 de 2009b.

Riley, C. M. "Relation of chemical properties to the bloating of clays." *Journal of the American ceramic society*. Citado por: Lorprayoon, C. e Rattanacha, S. (2005).

Roxo, J., Chitas, P., Sousa, F., Baião, C. e Reis, C. A. "Aplicação de Geoleca na reabilitação de um muro de suporte com 10 m de altura." *12º Congresso Nacional de Geotecnia: Caso de obra*. Guimarães, 2010.

Saint-Gobain Weber. "Processo de fabricação da argila expandida Leca." *www.weber.com.pt*. 2008. (acedido em 01 de dezembro de 2010).

Saint-Gobain Weber. "GeoLeca: Fabrico." *Seminário Geoleca - Utilização de Agregados Leves Leca em Geotecnia*. Lisboa, 2009.

Saint-Gobain Weber. "Ficha Técnica - Geoleca." 2011a.

Saint-Gobain Weber. *Manual técnico Geoleca*. 2011b.

Saint-Gobain Weber. "Resistência da Geoleca à fluência: determinação experimental e extrapolação." *Newsletters Geo Leca*, Nº 7, 2011c.

Saint-Gobain Weber. "Técnicas construtivas." *2º Seminário Geoleca*. Lisboa, 2011d.

Sheeley, M. e Negussey, D. "An investigation of Geofoam interface strength behavior." *ASCE Geoinstitute Soft Ground Technology Conference*. 2004.

Silva, B. M. M. "Betão leve estrutural com agregados de argila expandida." *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP*. Porto, 2007.

Sol Solution - Géotechnique Reseaux. "L'innovation sur de solides appuis." *Catalogue-M3S*. France, 2011.

Sotecnisol. "Materiais: Poliestireno Expandido." *www.sotecnisol.pt*. 2011. (acedido em 5 de janeiro de 2011).

Spasojevic, S., Mitrovic, P., Vujanic, V. e Jotic, M. "The application of EPS in geotechnical practice." *4º Conference EPS 2011*. Norway, 2011.

Srirajan S., Negussey D. e Anasthas N. "Creep Behavior of Eps Geofoam" *Geofoam Research Center*, Syracuse University, New York, 2001.

Tensar International Limited. "Bristish Board of Agreement- Tensar TW1 wall system for reinforced soil retaining walls and bridge abutments." *BBA(British Board of Agrément)- Technical approvals for constrution*. Watford, 2008.

Texsa. "Texxam." *Catálogo técnico do geotêxtil Terram*. Alpiarça, 2011.

The Eps Molders Association. *www.epsmolders.org*. 2011. (acedido em 1 de abril de 2011).

Watn, A., Gylland, A., Hyrve, O. e Reis, C. A. "Expanded clay lightweight aggregates for geotechnical applications." *Research project by SINTEF Civil*. Norway, 2010.

Watn, A., Oiseth, E. e Aaboe, R. "Reinforced slope of road embankment with light weight aggregates." *Report of project: E6 Egemarka*. Norway, 2007.

Watn, W. "Lightweight aggregates for civil engineering. Technical solutions, mechanical properties, certification and quality control." *Research Projects by SINTEF*. Norway, 2008.